

Laserstrahlbasierte Entgrat- verfahren für feinwerktechnische Anwendungen

Von der Gemeinsamen Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von Dipl.-Ing. Tilmann Schmidt-Sandte
aus Hannover

eingereicht am: 25. Januar 2002
mündliche Prüfung: 28. Mai 2002

Berichterstatter: Prof. a. D. Dr.-Ing. Helmut Wohlfahrt
Prof. Dr. rer. nat. Stephanus Büttgenbach
Dr. rer. nat. Ingo Decker

Kurzfassung

Der Einsatzbereich für Laserentgraten leitet sich von derzeit kritischen Entgrataufgaben aus der Fertigung ab. Diese Arbeit beschränkt sich auf Stahlwerkstoffe. Zu entfernen sind Feingrate und als Ergebnis steht das Erzeugen scharfkantig-gratfreier Kanten an kleinen Bauteilen im Vordergrund.

Die maßgeblichen Parameter zum Laserentgraten werden identifiziert und deren Einfluss auf das Entgratergebnis experimentell untersucht. Für die Versuche wird ein lampengepumpter, gütegeschalteter Nd:YAG-Laser in Kombination mit einem Spiegelscanner eingesetzt.

Basierend auf den allgemeinen Grundlagen des Laserabtragens und den experimentellen Ergebnissen werden Ansätze für ein phänomenologisches Prozessmodell formuliert. Insbesondere die Intensität und Pulsdauer der Laserstrahlung beeinflussen signifikant den Anteil zwischen Schmelz- und Abdampfrate und sind daher als verfahrenscharakteristische Parameter zu verstehen. Das Verhältnis der Gratabmessungen zur Wärmeeindringtiefe pro Puls wirkt sich maßgeblich auf die Gratentfernung aus.

In der vorliegenden Arbeit werden zum Entgraten für feinwerktechnische Anwendungen als Laserverfahren das Verrunden und Entfernen der Gratfahnen durch Laserumschmelzen, -mikroabtragen oder -spanen klassifiziert. Anhand von anwendungsbezogenen Verfahrensentwicklungen wird die erzielbare Qualität exemplarisch demonstriert und die Funktion des Laserentgratens nachgewiesen.

Laserspanentgraten steht aufgrund der möglichen Kantenmaße bis $-500\text{ }\mu\text{m}$ in direkter Konkurrenz zum ECM-Formentgraten. Laserfeinentgraten durch Umschmelzen und Mikroabtragen eignet sich vorzugsweise zum Entfernen von Feinstgraten mit dem Ergebnis, dass Kantenmaße im Bereich 0 bis $-30\text{ }\mu\text{m}$ erzeugt werden.

Vorwort

Zwei wichtige Grundlagen für diese Arbeit waren meine Doktorandentätigkeit bei der Robert Bosch GmbH und die wissenschaftliche Unterstützung durch das Institut für Schweißtechnik der TU Braunschweig. Bei Herrn Prof. Wohlfahrt und Herrn Dr. Decker möchte ich mich für die wissenschaftliche Begleitung in wohlwollender Art und Weise und für die Übernahme je eines Berichts bedanken. Insbesondere danke ich Herrn Dr. Decker für die Besuche in Schwieberdingen und die konstruktiven Diskussionen sowie Herrn Prof. Wohlfahrt für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Büttgenbach als Berichterstatter und Herrn Prof. Hesselbach als Vorsitzenden der Prüfungskommission.

Die hervorragenden Arbeitsbedingungen bei der Robert Bosch GmbH im Bereich Forschung und Vorausbildung waren ein wichtiger Faktor, mich auf die wissenschaftliche Arbeit fokussieren und zielgerichtet arbeiten zu können. Herrn Dr. De Paoli, Herrn Dr. Benz und Herrn Dr. Schmitz danke ich dafür, diese Bedingungen geschaffen zu haben. Herrn Dr. Schneider und nachfolgend Herrn Dr. Jürgen Rapp danke ich, meine Arbeit betreut und auf sehr motivierende Art und Weise gefördert zu haben, indem Sie meine Ergebnisse nicht nur hinterfragt und dabei viele Anregungen gegeben, sondern mir auch kreative Freiräume gelassen haben.

Ebenso richtet sich mein Dank an die Kollegen der Abteilungen FV/PLV, FV/PLM und BFV21 sowie der Werksbereiche, die mich nicht nur mit vielen Informationen versorgt haben, sondern auch zahlreiche fachliche Diskussionen mit mir geführt haben. Hervorheben möchte ich Herrn Westphal, mit dem ich viele experimentelle Ergebnisse eingehend diskutieren konnte und der mich mit seinem fachlichen Rat maßgeblich unterstützt hat. Bei Fragen in bezug auf theoretische Prozessgrundlagen war Herr Dr. Gert Callies nicht nur aufgrund seines Fachwissens sondern auch als Mensch mein bevorzugter Ansprechpartner. Auch weil er mir durch das Korrekturlesen wichtige Anregungen gegeben hat, möchte ich ihm sehr herzlich danken. Ebenso danke ich Herrn Dr. Johannes Wais für die Korrektur von Teilen der Arbeit.

Gerne danke ich auch meinen Doktorandenkollegen Thomas Wawra, Andreas Herrmann, Michael Honer, Matthias Schmidt sowie Klaus Spannemann und Philippe Jäckle für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung im Arbeitsalltag, so dass sie Freunde für mich geworden sind.

Zum Schluss aber doch an erster Stelle möchte ich meinen Eltern und meiner Frau Kerstin ganz herzlich danken. Meine Eltern haben mich immer unterstützt, zu mir gehalten und mir mein Studium ermöglicht. Und meine Frau Kerstin hat mir Zuhause nicht nur den nötigen Rückhalt gegeben, sondern mich immer wieder ermutigt und aufgemuntert.

Stuttgart, den 15. Juni 2002

Tilman Schmidt-Sandte

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Vorwort	iii
Verwendete Abkürzungen und Symbole	viii
1 Einführung in das Entgraten	1
2 Entgrattechnik	3
2.1 Kennwerte für Grate und Kanten	3
2.1.1 Definition von Gratkenngößen	4
2.1.2 Kantenklassifizierung nach DIN 6784	5
2.2 Klassifizierung der Entgratverfahren	6
2.3 Konventionelle Entgratverfahren	7
2.3.1 Elektro-chemisches Entgraten	8
2.3.2 Thermisch-chemisches Entgraten	10
2.3.3 Hochdruckwasserstrahlentgraten	11
2.3.4 Gleitschleifen	12
3 Laserabtragen – Stand von Wissenschaft und Technik	15
3.1 Einführung und Verfahrensübersicht	15
3.2 Prozessgrundlagen	17
3.2.1 Energieeinkopplung durch Fresnelabsorption	17
3.2.2 Wärmeleitung im Werkstück	18
3.2.3 Laserinduziertes Verdampfen	23
3.2.4 Reaktives Abtragen – Laserspanen	25
3.3 Laserabtragverfahren	27
3.3.1 Eindimensionale Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück	28

3.3.2	Flächiges Abtragen	29
3.3.3	Realisierte Anwendungen zum Laserabtragen	31
3.4	Stand des Laserentgratens	32
3.4.1	Differenzierung von Laserentgratverfahren	32
3.4.2	Wichtige Prozessparameter	33
3.4.3	Bekannte Laserentgratanwendungen	35
3.4.4	Maßnahmen zur Prozesssicherung	40
4	Motivation und Aufgabenstellung	43
4.1	Einsatzgrenzen für Entgratverfahren	43
4.2	Aufgabenstellung und Gliederung der Arbeit	44
5	Anforderungen an das Laserentgraten	45
5.1	Werkstück- und Anwendungsspektrum	45
5.1.1	Klassifizierungsschema für Laserentgratanwendungen .	46
5.1.2	Anwendungsschwerpunkte für Laserentgraten	47
5.2	Pflichtenheft zur Verfahrensentwicklung	48
5.3	Detaillierung der Anforderungen	49
5.3.1	Bewertungskriterien zur Verfahrensbeurteilung	49
5.3.2	Gewichtete Anforderungen an Laserentgraten	49
5.4	Ansätze zur Realisierung	52
5.4.1	Geeignete Prozessmechanismen	52
5.4.2	Möglichkeiten der Verfahrensführung	54
5.4.3	Einsetzbare Anlagentechnik	55
6	Einfluss der Prozessparameter	57
6.1	Übersicht und Einordnung der Parameter	57
6.1.1	Parameterauswahl	59
6.2	Aufbau der Versuchsentgratanlage	59
6.2.1	Charakterisierung der Versuchsanlage	60
6.2.2	Musterkanten für Entgratversuche	62
6.3	Geometrische Kennwerte für laserentgratete Kanten	64
6.4	Experimentelle Ergebnisse	66
6.4.1	Intensität der Laserstrahlung	66
6.4.2	Strahlführungsparameter	69
6.4.3	Parameter der Streckenenergie	74
6.5	Diskussion der Ergebnisse	79

7	Ansätze einer Prozessmodellierung	83
7.1	Phasenaufteilung des Laserentgratens	83
7.2	Aufheizen des Kantenbereichs	85
7.2.1	Wärmeleitung an einer Kante ohne Grat	85
7.2.2	Wärmeleitung gratbehafteter Kanten	86
7.2.3	Zusammenfassung	91
7.3	Gratentfernung	92
7.4	Ausbildung der Kantenform	93
7.4.1	Mikroabtrag des Kantenbereichs	93
7.4.2	Intensitätsabhängigkeit der Kantenform	96
7.4.3	Auswirkung der Parameter auf die Kantenmaße	100
7.5	Prozessgestaltung zum Laserentgraten	103
7.5.1	Auswahl des Prozessmechanismus	103
7.5.2	Eingrenzung von Parameterbereichen	104
7.6	Fehlermöglichkeiten-Einfluss-Analyse	105
7.6.1	Fehlerklassifizierung anhand des Entgratergebnisses .	105
7.6.2	Auswirkung fehlerhafter Parameter	105
8	Anwendungsbeispiele	113
8.1	Umschmelzen von Stanzgrat	113
8.2	Laserspanentgraten von Fräsgraten	117
8.3	Feinentgraten durch automatisiertes Mikroabtragen	119
8.3.1	Verfahrensgestaltung	120
8.3.2	Positionieren mit Bildverarbeitung	123
8.4	Zusammenfassung	126
9	Einordnung und Bewertung des Laserentgratens	129
9.1	Vergleich zu konkurrierenden Entgratverfahren	130
9.1.1	Laserspanentgraten	132
9.1.2	Laserfeinentgraten	134
9.2	Kostenbetrachtung für Laserentgraten	136
10	Zusammenfassung und Ausblick	139
	Literatur	143

Verwendete Abkürzungen und Symbole

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
Abkürzungen		
AFM		Druckfließläppentgratverfahren
cw		continous wave – Dauerstrichbetrieb
DIN		Deutsche Industrienorm
ECM		Elektro-chemisches Entgratverfahren
FMEA		Fehlermöglichkeiten-Einfluss-Analyse
HDW		Hochdruckwasserstrahlentgraten
HE		Hydro-erosiv
MIC		Mikroabtragentgraten
NC		Numerisch gesteuert
PC		Personal Computer
pw		pulsed wave – gepulste Laserstrahlung
QS		Q-switch – Güteschaltung
REM		Rasterelektronenmikroskop
TEM		Thermisch-chemisches Entgratverfahren
US		Umschmelzentgraten
WEZ		Wärmeeinflusszone
Kleine Formelzeichen		
a	μm	Kantenmaß, Abtragtiefe
b	μm	Gratdicke
b_f	μm	Gratfußbreite
b_k	μm	Kantenfehlbreite
d_a	μm	Abtragdurchmesser
d_f	μm	Fokusbereich
d_w	μm	Strahldurchmesser in der Wirkstelle
f	mm	Brennweite einer Linse bzw. Objektivs
f_p	1/s	Pulsrepetitionrate
g	μm	Gratwert
h	μm	Grathöhe
h	μm	Höhe eines Aufwurfs
k	[1]	Imaginäranteil des Brechungsindex
l	mm	Länge einer Kante
m	kg	Masse

Fortsetzung

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
n	[1]	Realanteil des Brechungsindex
n	[1]	Anzahl der Bearbeitungsschritte
r_f	μm	Gratfußradius
r_k	μm	Verrundungsradius
t	s	Zeit, Bestrahlungsdauer
u	%	Prozentualer Pulsüberlapp in Vorschubrichtung
v	mm/s	Vorschubgeschwindigkeit
w_0	μm	Radius der Strahltaile
x	—	Koordinate normal zur Kante
y	—	Koordinate entlang der Kante
z	—	Koordinate in Richtung der Laserstrahlachse

Große Formelzeichen

A	[1]	Absorptionsfaktor
A_{el}	kg/A s	Elektrochemisches Äquivalent
D	mm	Bohrungsdurchmesser
E_p	mJ	Pulsenergie
E_s	J/mm	Streckenenergie
F	μm^2	Profilfläche des Kantenabtrag
H	J/mm ²	Energiedichte (Fluenz)
H		Härte
I	W/cm ²	Laserstrahlintensität
I_0	W/cm ²	Maximale Intensität im Gausstrahl
I_m	W/cm ²	Mittlere Laserstrahlintensität
M^2	[1]	Strahlqualität eines Laserstrahls
N	[1]	Komplexer Brechungsindex
P_{av}	W	Mittlere Laserstrahlleistung
R	[1]	Reflexionsfaktor
T	°C	Temperatur
T_m	°C	Schmelztemperatur
T_v	°C	Verdampfungstemperatur
T_z	°C	Zündtemperatur

Fortsetzung

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
Griechische Symbole		
α	Grad	Einstrahlwinkel
α_A	1/m	Absorptionskoeffizient
δ	m	Diffusionslänge
κ	m ² /s	Temperaturleitfähigkeit
λ	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
λ	nm	Wellenlänge der Laserstrahlung
τ_H	s	Pulslänge der Halbwertspulsintensität
ϑ	Grad	Kantenwinkel
φ	Grad	Winkel der Kantenverrundung (Fasenwinkel)
Δ_p	μm	Pulsvorschub
Δx	μm	lateraler Strahlüberlapp mit der Kante
Indizes		
a		bezogen auf das äußere Kantenmaß
abs		absorbiert
i		bezogen auf das innere Kantenmaß
f		Taille der fokussierten Laserstrahlung
k		Kante
p		Puls
s		Strecke entlang der Kante
w		Wirkstelle der Laserstrahlung

Kapitel 1

Einführung in das Entgraten

„Ein Grat ist das unerwünschte Werkstoffgebilde, das an Kanten oder auf der Werkstückoberfläche bei der Fertigung entsteht...“ (F. Schäfer [1])

Ein primäres Ziel ist es somit, die Gratentstehung in der Fertigung so gut wie möglich zu minimieren [2, 3]. Dieses lässt sich zum einen durch eine entgratgerechte Gestaltung der Bauteile, zum anderen durch eine Reihenfolgeoptimierung der Fertigungsschritte erreichen. Dennoch kann die Gratbildung oftmals nicht ganz verhindert werden, so dass es erforderlich wird, Grate von Bauteilkanten zu entfernen.

Die Gründe für Entgraten sind mannigfaltig und in Abbildung 1.1 in einer Übersicht dargestellt. Grundlegend werden drei Hauptgründe des Entgratens unterschieden:

- Der *ästhetische Aspekt* gilt im Wesentlichen nur für sichtbare Grate.
- Der *ergonomische Aspekt* spielt dann eine Rolle, wenn das Bauteil der Handhabung bzw. dem Gebrauch durch den Menschen ausgesetzt wird.
- Der *funktionale Aspekt* ist dann von Bedeutung, wenn das Werkstück eine technische Funktion erfüllt. Für das Entgraten in der industriellen Fertigung steht er damit im Vordergrund.

Welcher Grund für das Entgraten im Vordergrund steht, hängt auch von dem Grat selber ab. Während große Grate in erster Linie nachfolgende Fertigungsschritte maßgeblich beeinflussen, wirken sich kleine Grate, die am Bauteil verbleiben, hauptsächlich auf die spätere Funktion des Bauteils aus.

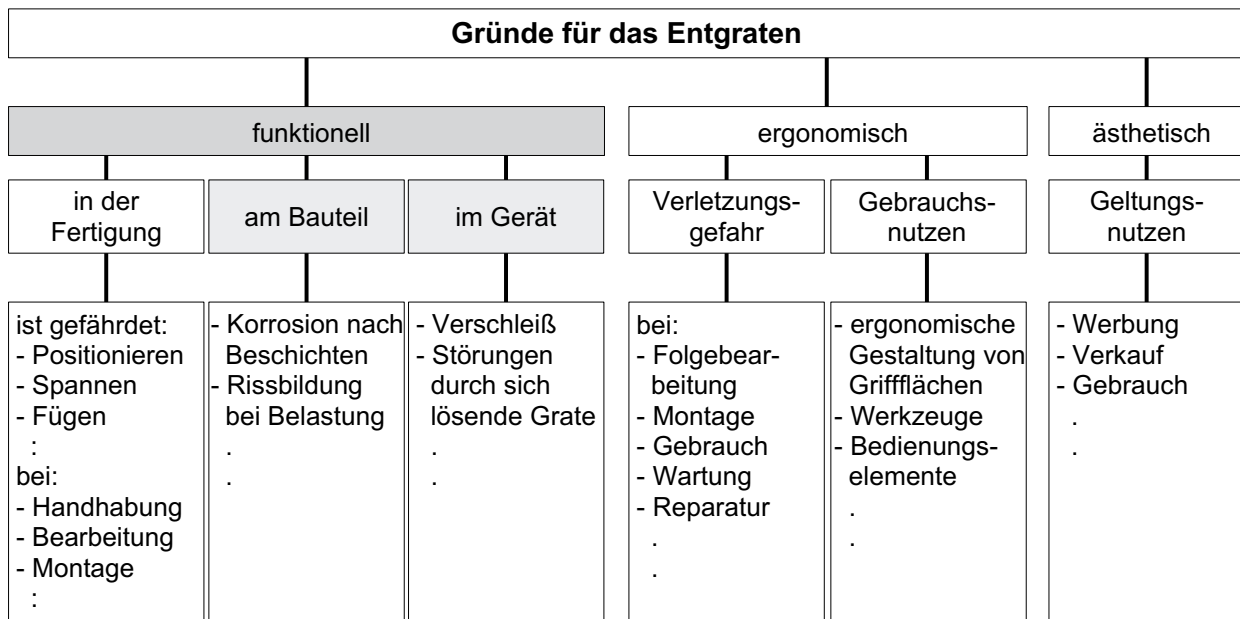


Abb. 1.1: Gründe für das Entgraten (nach Schäfer [1])

Je nach Entgratgrund ändern sich die Anforderungen an den Entgratprozess. Folgen weitere Fertigungsschritte, können beispielsweise Verschmutzungen oder Restgrate toleriert werden. Wenn aber Entgraten als letzter Fertigungsschritt zum Finishing eingesetzt wird, erhöhen sich die Anforderungen an das Entgratergebnis bezüglich verbleibender Restgrate, Verschmutzungen oder Wärmeeinflusszonen erheblich.

Kapitel 2

Entgrattechnik

Zur Auswahl eines Entgratverfahrens und der verfahrenstechnischen Gestaltung des Entgratprozesses ist die Entgrataufgabe zu definieren. Die Entgrataufgabe umfasst nach Beier [4] folgende Aspekte:

- Werkstück: Abmaße, Kanten geometrie und Werkstoff
- Grate: Gratabmessungen und Gratlage
- Gefordertes Entgratergebnis und Randbedingungen
- Nachfolgende Fertigungsschritte
- Taktzeit und Stückzahl
- Zulässige Kosten

Im folgenden Abschnitt 2.1 werden zunächst Kennwerte zur Grat- und Kantenbeschreibung definiert. Anhand eines Klassifizierungsschemas in Abschnitt 2.2 können Entgratverfahren charakterisiert werden. Die Beschreibung ausgewählter konventioneller Entgratverfahren erfolgt in Abschnitt 2.3.

2.1 Kennwerte für Grate und Kanten

Um die Wirkung eines Entgratverfahrens auf den Grat und die Kante beurteilen zu können, muss der Zustand der Kante vor und nach der Bearbeitung verglichen werden. Dieses erfordert eine detaillierte Beschreibung der Kante und des Grates. Weil eine exakte Gratbeschreibung immer der Schwierigkeit unterliegt, dass Grate unregelmäßig und nicht reproduzierbar sind, werden in der Literatur idealisierte Gratkenngrößen definiert. Grundlegende Begriffe zur Gratdefinition, wie sie im Rahmen dieser Arbeit Verwendung finden, werden in diesem Abschnitt erläutert.

Einen Einfluss auf den Entgratprozess hat nicht nur die Gratgröße, sondern auch die Lage des Grates am Werkstück. So wird zwischen Außen- und Innengrat unterschieden: wenn die Oberfläche des Bauteils als Systemgrenze definiert wird, dann werden alle Grate, die über diese Grenze hinausgehen als Außengrate bezeichnet [5]. Grate, die innerhalb von Bohrungen liegen, sind demnach ein Beispiel für Innengrate. Eine weitere Unterscheidung wird hinsichtlich der Gratentstehung getroffen: Grate, die im Entstehungszustand vorhanden und noch keiner Bearbeitung unterzogen wurden, werden als Primärgrate und Grate, die durch ein Entgratverfahren selbst verursacht werden, als Sekundärgrate bezeichnet [4].

2.1.1 Definition von Gratkenngrößen

Abbildung 2.1a zeigt die idealisierte Darstellung eines Grates. Die Linie des angenommenen Berührungsortes von Grat zu Werkstückoberfläche wird als Gratbasisprofil bezeichnet. Der Gratquerschnitt ist die Fläche, die durch einen Schnitt senkrecht zum Gratbasisprofil entsteht. Bezogen auf das Gratbasisprofil und den Gratquerschnitt werden folgende Größen definiert [1, 4]:

- Die Gratfußbreite b_f beschreibt die Verbindungsstelle zwischen Werkstück und Grat und ist ein wesentliches Merkmal, das die mechanische Entfernbarekeit eines Grates bestimmt.
- Der Gratfußradius r_f dient zur Beschreibung der Kerbwirkung an der Verbindungsstelle zwischen Werkstück und Grat. Anhand der Kerbwirkung kann abgeschätzt werden, ob ein Grat abgebrochen werden kann oder zerspannt werden muss.
- Die Gratdicke b wirkt sich im Zusammenhang mit der Gratfußbreite auf die Entfernbarekeit des Grates aus.
- Die Grathöhe h variiert in Gratlängsrichtung und wirkt sich maßgeblich auf das Grativolumen aus.
- Die Gratlänge l entspricht oftmals der Länge der betrachteten Kante. Wichtig für das Entgraten ist es, ob der Grat in Kantenrichtung unterbrochen oder geschlossen ist [5]. Grate an Bohrungen mit geschlossenem Längsprofil weisen eine hohe Eigensteifigkeit auf und sind somit mechanisch schwerer entfernbar.

Um die Gratbeurteilung zu vereinfachen, können die vier Gratgrößen aus dem Gratquerschnitt zu einer Kenngröße, dem Gratwert g , zusammengefasst werden. So soll eine grobe Interpretation des Grates und seiner Auswirkungen auf einen mechanischen Entgratprozess erleichtert werden. Der Gratwert

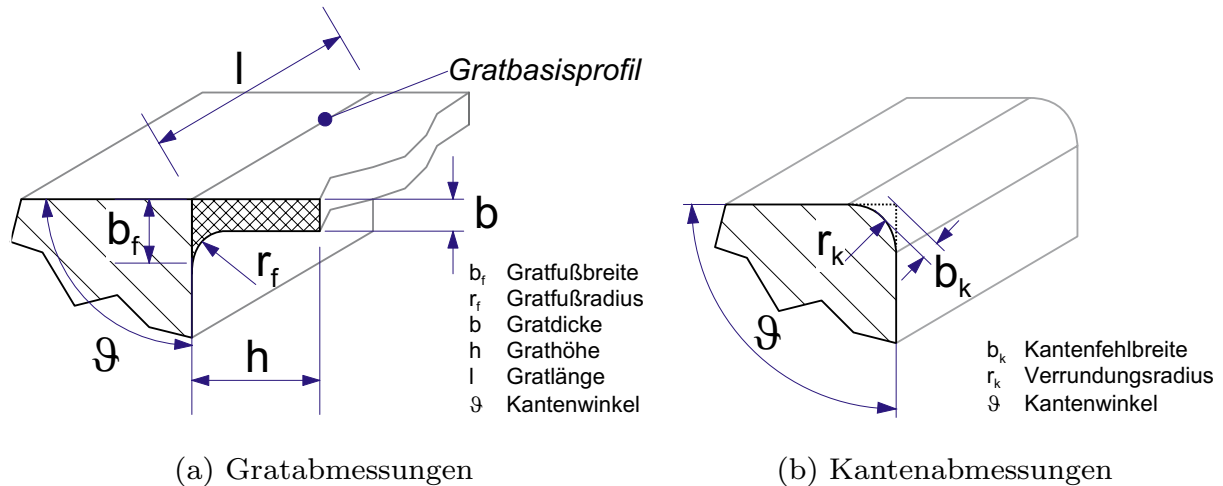


Abb. 2.1: Querschnittsbezogene Kennwerte für Grate und Kanten
(nach [1, 4])

g ist nach [2, 6] wie folgt definiert:

$$g = \frac{4b_f + 2r_f + b + h}{8} \quad (2.1)$$

Als Kennwerte für eine verrundete Kante definiert Schäfer [1] den Verrundungsradius r_k sowie die Kantenfehlbreite b_k (Abb. 2.1b).

2.1.2 Kantenklassifizierung nach DIN 6784

Das Entgratergebnis wird in erster Linie daran beurteilt, ob die Grate vollständig entfernt wurden oder Restgrate an der Kante verbleiben. Diese Prüfung erfolgt in der industriellen Fertigung zu einem hohen Anteil qualitativ durch eine Sichtkontrolle und unterliegt dem subjektiven Empfinden des jeweiligen Prüfers. Ist eine bestimmte Kantenform erforderlich, weil die Funktion eines Bauteils von der Kantenform abhängt, so ist diese durch Maße zu definieren. Dazu sind die Regeln und Normen der technischen Bemaßung anzuwenden. Eine allgemeine Beschreibung für Werkstückkanten liefert die DIN 6784 [16]. Grundlegend wird für eine Außenkante in drei Kantenzustände unterschieden, die in Abbildung 2.2 grafisch dargestellt sind:

- **Gratig:** Werkstückkante mit Überhang (Grat).
- **Scharfkantig:** Werkstückkante, deren Überhang oder Abtragung angenähert Null ist.
- **Gratfrei:** Werkstückkante mit Abtragung (Fase bis Rundung).

In der Praxis wird der Bereich „scharfkantig“ noch durch den Begriff „scharfkantig–gratfrei“ unterteilt, was bedeutet, dass kein Überhang zulässig ist.

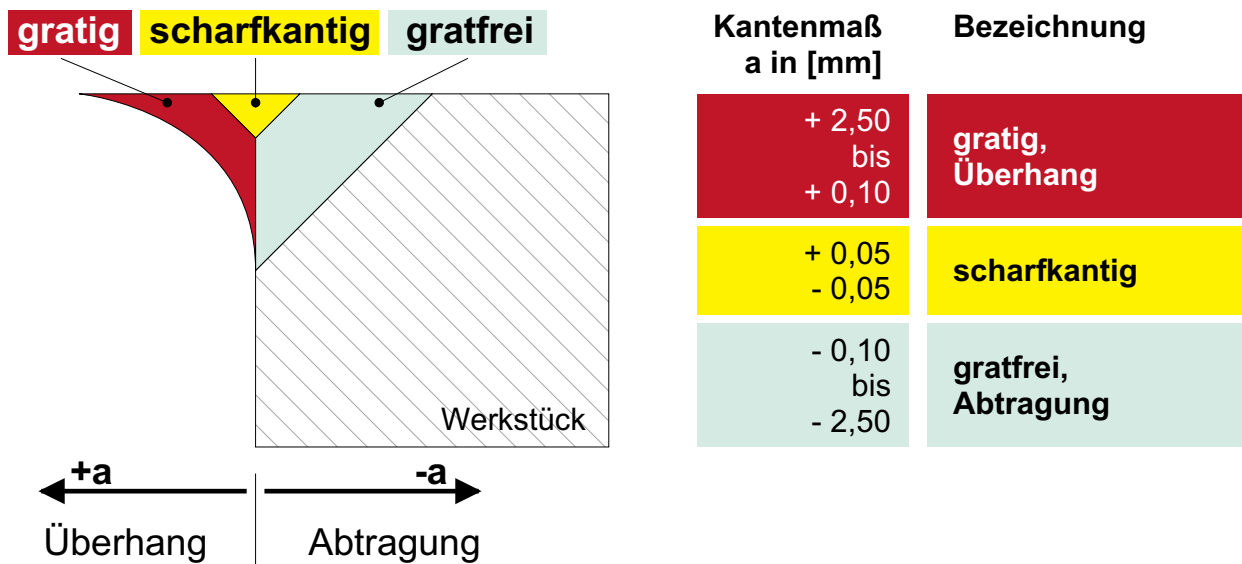


Abb. 2.2: Kenngrößen einer Werkstückkante nach DIN 6784

Zur quantitativen Beschreibung wird das Kantenmaß a eingeführt. Es ist ein Maß für den Kantenbereich, in dem die Istform der Kante beliebig von der ideal-geometrischen, scharfkantigen Form abweichen darf. Zu beachten ist, dass durch die allgemeine Definition nach DIN 6784 keine Aussage über die Kantenform getroffen wird. Das Kantenmaß a gibt die Größe und der durch Schäfer definierte Verrundungsradius r_k die Form der Kantenverrundung an. Nur bei einer ideal-kreisförmigen Verrundung entspricht das Kantenmaß dem Verrundungsradius.

2.2 Klassifizierung der Entgratverfahren

Die Vielzahl der bekannten Entgratverfahren lässt sich nach verschiedenen Gesichtspunkten klassifizieren. Boley und Stolz [7] haben Entgratverfahren klassifiziert (Abb. 2.3) und unterscheiden primär zwischen gezielt und ungezielt wirkenden Entgratverfahren. Ungezielte Verfahren eignen sich besonders dann, wenn viele Kanten an einem Bauteil kostengünstig zu entgraten sind und die Anforderungen an das zu erzielende Entgratergebnis bezogen auf eine Kante gewisse Toleranzen aufweisen. Die abtragende Wirkung eines ungezielt wirkenden Verfahrens lässt sich streng genommen aber nicht nur auf die Kante eingrenzen: zwar werden die Kanten und Grate aufgrund ihrer speziellen Geometrie und Lage bevorzugt abgetragen aber auch angrenzende Oberflächen können beeinflusst werden. Um dagegen mit den gezielt wirkenden Entgratverfahren ausschließlich die Kanten zu bearbeiten, ist ein Positionierungsaufwand erforderlich. Somit lassen sich mit den gezielt wirkenden Verfahren prinzipiell präzisere Entgratergebnisse erzielen, wobei eine hohe Entgrat-Präzision in der Regel mit einem hohen Positionieraufwand

einhergeht.

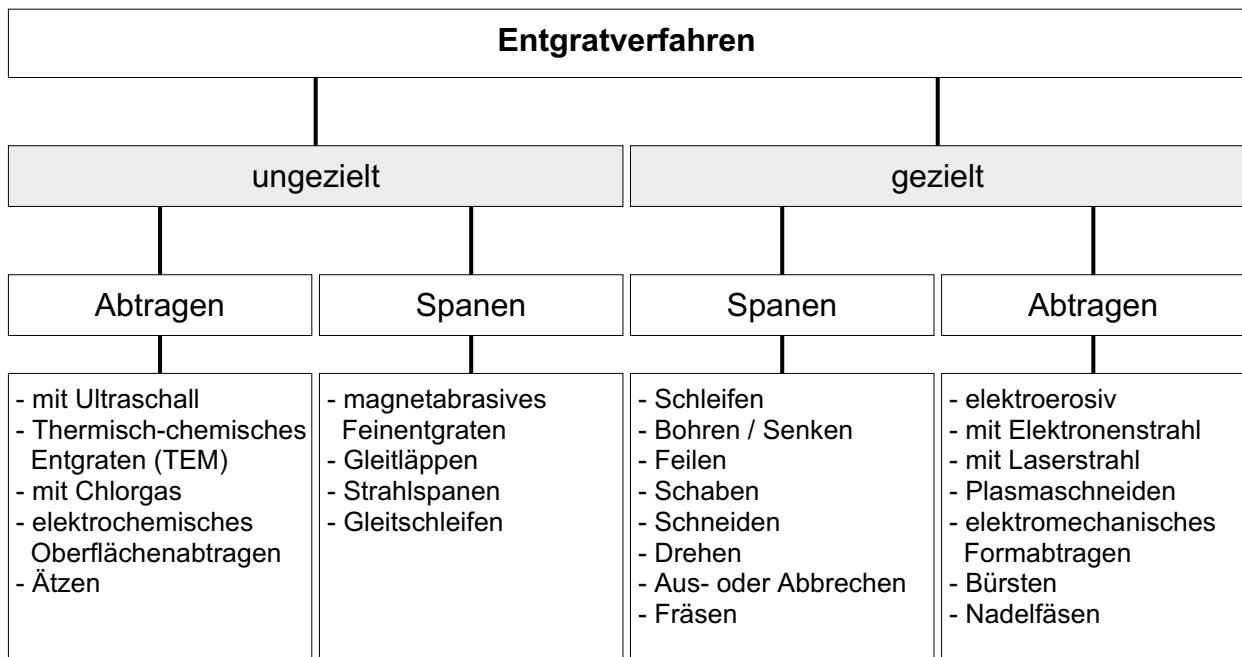


Abb. 2.3: Klassifikation der Entgratverfahren (nach Boley und Stolz [7])

Unabhängig von der Einteilung in gezielt und ungezielt wirkende Entgratverfahren unterscheidet Beier [4] ferner vier Entgratprinzipien:

- *Zerteilen* wird hauptsächlich bei der Nachbehandlung von Gussstücken eingesetzt. Grate werden abgeschlagen, abgebrochen oder durch Schneiden abgetrennt.
- *Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide* ist durch ein hohes Zeit-spanvolumen gekennzeichnet und ermöglicht eine hohe Entgratqualität.
- *Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide* wird sehr häufig zum Entgraten eingesetzt. Die einzelnen Verfahren sind bezogen auf Trennleistung, Energiebedarf und Automatisierbarkeit sehr unterschiedlich.
- *Abtragen* ist das Abtrennen von Stoffteilen von einem festen Körper auf nichtmechanischem Wege. Dabei wird in thermisches, chemisches und elektrochemisches Abtragen unterschieden.

2.3 Konventionelle Entgratverfahren

Aus der Vielzahl der bekannten Entgratverfahren sollen im Folgenden vier Entgratverfahren näher beschrieben werden. Aus der Gruppe des Entgratens durch Abtragen sind das elektro-chemische (ECM) und thermisch-chemische

Entgraten (TEM) industriell wichtige Verfahren. Während mit ECM gezielt entgratet werden kann, läßt TEM nur eine ungezielte Entgratwirkung zu. Wasserstrahlentgraten steht als gezielt wirkendes Strahlverfahren in Verbindung zum Laserstrahlentgraten. Aus der Gruppe der Entgratverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide nimmt das Gleitschleifen (Gleitspanen) als wirtschaftliches Massententgratungsverfahren eine wichtige Rolle ein.

2.3.1 Elektro-chemisches Entgraten

Die elektro-chemische Metallbearbeitung beruht auf dem Prinzip der anodischen Auflösung von Metallen [8]. Dazu wird zwischen einer Anode und Kathode eine elektrische Gleichspannung angelegt, so dass bei elektrischer Verbindung von Anode und Kathode über eine leitende Elektrolytlösung ein elektrischer Strom fließt. Infolge des Elektronentransports durch den elektrischen Gleichstrom gehen die Metallatome in der Oberfläche der Anode in Ionenform über. In einer Sekundärreaktion verbinden sich diese Ionen mit wässrigen Bestandteilen der Elektrolytlösung, so dass ein Metallhydroxyd entsteht, welches als Metallschlamm ausfällt.

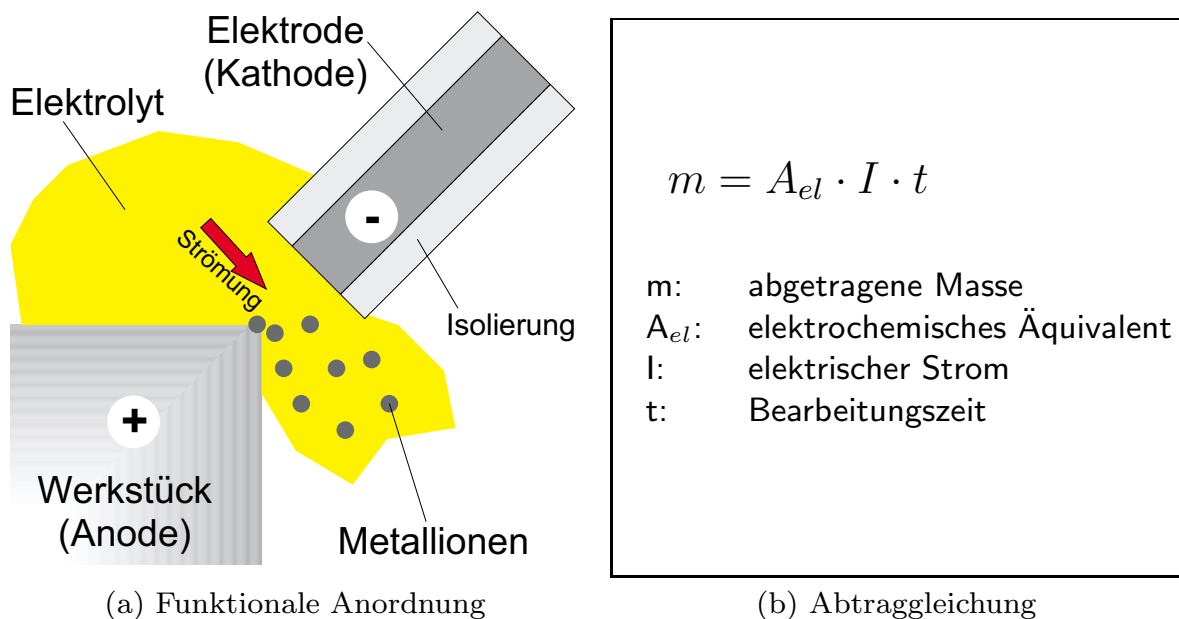


Abb. 2.4: Funktionsprinzip des elektro-chemischen Entgratens

In Abbildung 2.4a ist die technische Realisierung der ECM-Bearbeitung skizziert. Das Werkstück wird als Anode gepolt, die Kathode durch eine Werkzeugelektrode realisiert. Der Bereich zwischen Werkstück und Elektrode wird als Wirkspalt bezeichnet, dessen Breite im Bereich von 0,5 bis 2,0 mm liegt. Um den Stromfluss auf den Wirkspalt einzugrenzen und so präziser arbeiten zu können, werden die Seitenbereiche der Elektroden mit einer Kunststoffschicht isoliert [9]. Der Elektrolyt wird durch den Arbeitsspalt gepumpt und

hat die Aufgabe die Stromleitung zwischen Anode und Kathode zu gewährleisten, den Metallauflösungsvorgang zu beeinflussen sowie die Reaktionsprodukte und entstandene Wärme abzutransportieren. Als Elektrolyte kommen je nach Werkstoff und zu erzielende Oberflächenqualität hauptsächlich NaCl, NaClO₃, NaNO₃ sowie HCl und H₂SO₄ zum Einsatz [4]. Die Elektrolyte müssen in der Anlage durch Zentrifugen oder Filter von den Reaktionsprodukten (Metallschlamm) gereinigt werden.

Elektrochemisch können nur elektrisch leitfähige Metalle bearbeitet werden. Stahlwerkstoffe, deren Gefügeb Bestandteile unterschiedliche elektrische Leitfähigkeiten aufweisen, werden ungleichmäßig abgetragen. So wird beispielsweise bei Gusseisen, wo der Kohlenstoff als Graphit auftritt, das Graphitgefüge nicht abgetragen.

Über dem Wirkspalt gilt das Ohmsche Gesetz ($I = U/R$). Der ohmsche Widerstand R ist dabei in erster Linie von der Breite des Bearbeitungspaltes und dem Elektrolyt abhängig. Exponierte Bereiche des Werkstücks, wie Grate oder Kanten, werden somit bei geeigneter Anordnung und Form der Elektrode aufgrund der höheren Stromdichteverteilung an diesen Stellen schneller abgetragen. Dennoch wirken sich unregelmäßige Gratfußbreiten und Gratstärken negativ auf die Gleichmäßigkeit des Entgratergebnisses aus. Die Voreinstellung des minimalen Spaltabstandes ist so zu wählen, dass im ungünstigsten Fall kein Kurzschluss entsteht. Bei sehr großen Grattoleranzen ist gegebenenfalls die Entgratelektrode nachzuführen. Eine Übersicht über die Vor- und Nachteile des ECM-Entgratens gibt Tabelle 2.1.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Keine mechanische Belastung des Werkstücks. • Keine thermische Belastung des Werkstückgefüges. • Keine Bildung von Sekundärgraten. • Neben Gratentfernung auch Kantenverrundung möglich. • Gute Möglichkeiten zur Prozesssicherung. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur bei elektrisch leitenden Metallen möglich. • Werkstoffoberflächen müssen vor der Bearbeitung gereinigt sein. • Unterschiedliche Gefüge im Werkstoff bewirken hohe Rauigkeit. • Reinigung der Werkstücke nach ECM-Bearbeitung erforderlich.

Tab. 2.1: Vor- und Nachteile des ECM-Entgratens

Der Anwendungsschwerpunkt des ECM-Entgratens ist das Abtragen von großen Graten. Durch neue Entwicklungen, wie miniaturisierte Werkzeugelektroden und Prozesssicherungsmaßnahmen, können auch Präzisionsentgratungen mit ECM realisiert werden. Ferner ist es möglich, Kavitäten und

Bohrungen direkt mit ECM zu erzeugen, so dass erst gar keine Grate entstehen.

2.3.2 Thermisch-chemisches Entgraten

Physikalische Grundlage des thermisch-chemischen Entgratens (TEM-Entgraten) ist, dass Grate im Verhältnis zum Bauteil eine geringe Wärmekapazität und ein großes Oberflächen-Volumen-Verhältnis aufweisen. Bei schockartiger Wärmeeinwirkung heizen sich die Grate deswegen schneller als das Bauteil auf. Damit ist es mit Hilfe eines geeigneten Prozessgases möglich, selektiv die Grate zu verbrennen. In Abbildung 2.5 sind die technische Realisierung des TEM-Entgratens [8, 10] und die speziellen Wärmeleitungsverhältnisse an einem Grat skizziert.

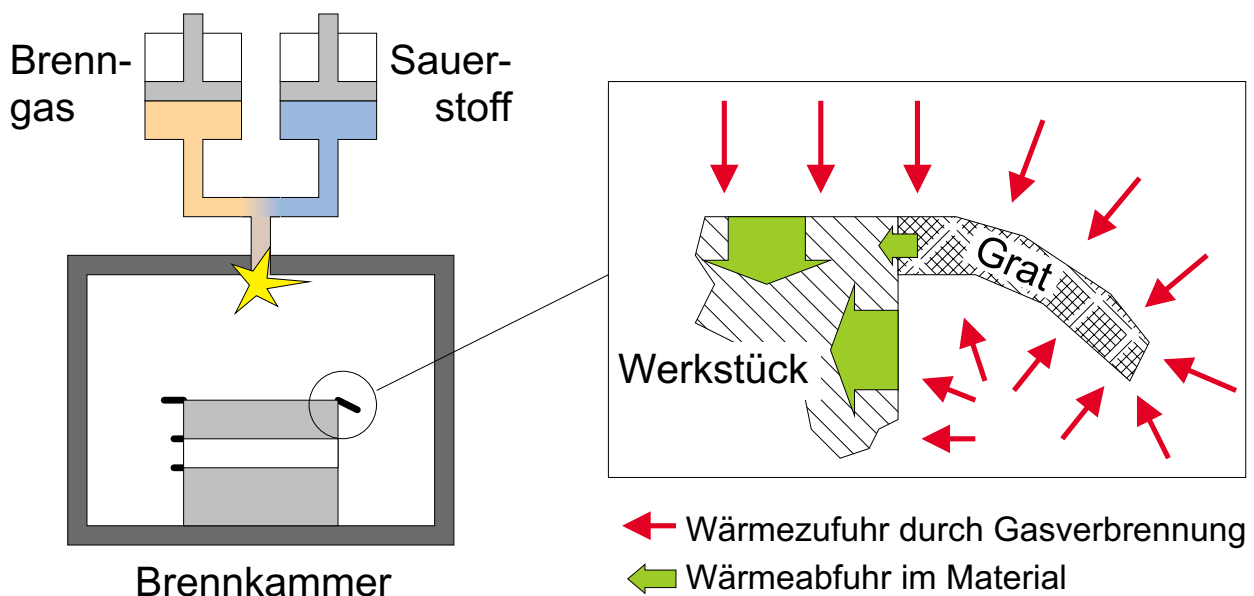


Abb. 2.5: Schematischer Anlagenaufbau und Wirkprinzip des TEM-Entgratens (teilweise nach [10])

Aus Brenngas (Wasserstoff, Methan oder Erdgas) und Sauerstoff wird ein Gasgemisch erzeugt und gezündet. Die Verbrennung des Gasgemisches setzt Wärmeenergie frei, so dass je nach Gemischzusammensetzung Temperaturen von 2500 bis 3500°C entstehen. Dünne Bauteilbereiche, Kanten und vor allem Grate absorbieren aufgrund ihrer zum Volumen relativ großen Oberfläche wesentlich mehr Wärme, als sie per Wärmeleitung an massive Bauteilbereiche abgeben können. Während sich so die massiven Bauteilbereiche nur langsam erwärmen, entsteht in den Graten ein Wärmestau, so dass sie schnell aufheizen. Erreichen die Grate Zündtemperatur, beginnen sie aufgrund der chemischen Reaktion mit dem Sauerstoff zu verbrennen. Der Verbrennungsvorgang der Grate dauert so lange an, wie genügend Sauerstoff in

der Atmosphäre vorhanden ist und die Temperatur des Grates oberhalb der Zündtemperatur bleibt. Insgesamt läuft der Verbrennungsvorgang innerhalb einer kurzen Zeit von ungefähr 10 – 20 Millisekunden ab. Die Grundtemperatur der Werkstücke steigt dabei auf ungefähr 90 – 120 °C [10].

Die Entgratwirkung hängt von der bei der Gasverbrennung freigesetzten Energie ab. Durch das Mischungsverhältnis und die Menge des Gases kann die freigesetzte Verbrennungsenergie und so die Entgratwirkung eingestellt werden. Um die erforderliche Gasmenge bereitzustellen, werden die Gase vor der Verbrennung verdichtet. Je nach Gasart und zu bearbeitendem Werkstoff wird mit Verdichtungsdrücken zwischen 5 – 42 bar gearbeitet [10].

Bei der Verbrennung der Grate entstehen Oxide, die sich auf der Werkstückoberfläche niederschlagen. Um diese Oxide vom Bauteil zu entfernen, werden die Werkstücke bei ungefähr 70 °C gebeizt, anschließend gespült und konserviert.

2.3.3 Hochdruckwasserstrahlentgraten

Die Hochdruckwasserstrahlbearbeitung gehört zu der Verfahrensgruppe des Strahlspanens mit flüssigem Strahlmittel. Die abtragende Wirkung des Hochdruckwasserstrahls ist durch Flüssigkeitserosion und Kavitation gekennzeichnet. Zur Strahlerzeugung und -formung werden Pumpen und Düsen eingesetzt, Abbildung 2.6 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Hochdruckwasserstrahlanlage. In der Praxis werden drei Konzepte unterschieden [4, 5, 11, 12, 13]:

1. Reinigungsanlagen mit Drücken unter 1000 bar und großer Durchflussmenge des Strahlmediums ($Q < 100\text{l/min}$),
2. Schneidanlagen mit sehr hohen Drücken zwischen 750 – 4000 bar bei niedriger Durchflussmenge (beispielsweise 2 l/min bei 4000 bar) und
3. abrasive Hochdruckwasserstrahl-Anlagen.

Je höher der Pumpendruck bei einer Anlage eingestellt wird, desto größer wird die Strahlaustrittsgeschwindigkeit an der Düse und die erzielbare Schnitttiefe steigt [4]. Beim Entgraten ist es wichtig, dass zwar die Grate entfernt, zur Kante benachbarte Oberflächen aber möglichst wenig beschädigt werden. Der Strahl muss also hinsichtlich seiner Form und Geschwindigkeit so eingestellt werden, dass nur die Grate abgeschlagen werden und kein Abtrag auf den umliegenden Oberflächen entsteht. Um dieses zu erreichen, sind oftmals große Abstände zwischen Düse und Werkstückoberfläche notwendig [14], bzw. geringe Drücke einzustellen.

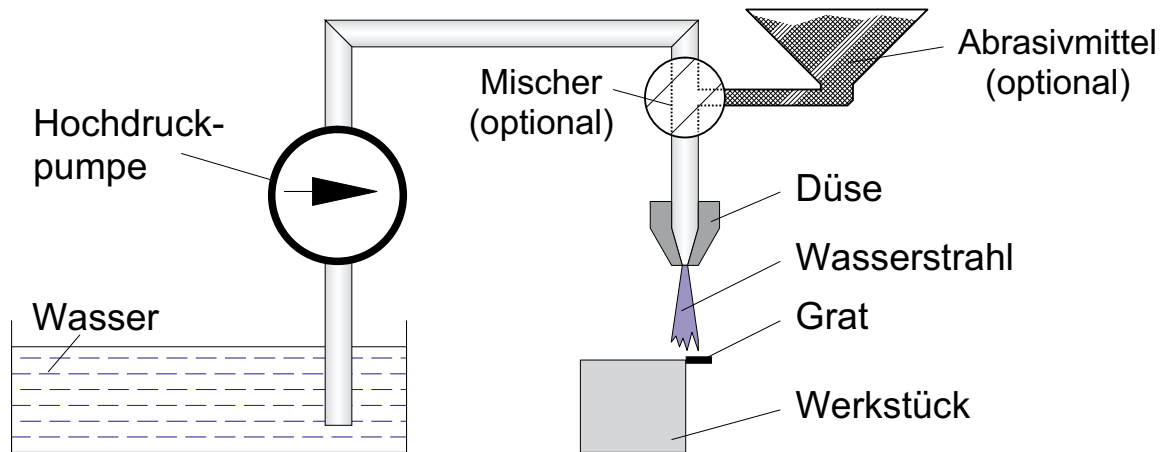


Abb. 2.6: Schema einer Hochdruckwasserstrahl-Entgratanlage

Unter diesem Gesichtspunkt ist das Abschlagen der Grate mit Reinigungsanlagen die am besten geeignete Methode des Hochdruckwasserstrahlentgratens [5]. Müssen aber duktile oder schwer zerspanbare Werkstoffe oder Grate mit großer Gratfußbreite entgratet werden und sind keine verbleibenden Restgrate zulässig, liefert das Hochdruckwasserstrahlentgraten mit Reinigungsanlagen unbefriedigende Resultate. In diesen Fällen werden Schneidanlagen mit hohen Drücken eingesetzt. Um die Trennwirkung des Strahls zu steigern, werden dem Flüssigkeitsstrahl Abrasivteilchen kleiner Korngröße zugegeben. Bei Abrasivmittelzusatz steigen die Anlagen- und Betriebskosten überproportional, da sämtliche Komponenten für hohe Drücke ausgelegt werden müssen und sich die Standzeiten der Schneiddüsen drastisch verkürzen.

2.3.4 Gleitschleifen

Gleitschleifen, auch unter dem Namen Trowalisieren bekannt, ist ein ungezielt wirkendes, mechanisch-chemisches Entgratverfahren [15]. Zwischen dem Werkstück und einem zugesetzten Schleifmittel wird eine Relativbewegung erzeugt, die sich in Schleifarbeit umsetzt. Eine Verfahrensunterscheidung wird anhand der Erzeugung der Relativbewegung durch Umwälzen, Vibration und Rotation getroffen [4].

Die Schleifmittel bestehen aus keramisch- oder kunstharzgebundenen Schleifkörpern zu denen flüssige Zusätze (als Compounds bezeichnet) hinzugefügt werden, um Schleifstaub abzubinden und Schleifspäne auszuschwemmen. Weitere Funktionen der Compounds umfassen Entfetten, Korrosionsschutz, Reinigen oder Beizen.

Prinzipiell wird beim Gleitschleifen die gesamte Werkstückoberfläche bearbeitet. Neben der Schleifkörpergeometrie wirkt sich hauptsächlich die Andruckkraft eines Schleifkörpers auf das Werkstück stark auf die Zerspanung

aus. Aufgrund ihrer exponierten Lage und dem damit verbundenen Anstieg der Andruckkraft auf die Schleifkörper in diesem Bereich werden die Kanten verstärkt abgetragen.

Für einen optimalen Entgratprozess müssen die Schleifkörper entsprechend auf die vorhandene Gratbasis an der Kante abgestimmt werden. Die Schleifkörpergröße und -form wird so gewählt, dass die zu entgratenden Kanten erreicht und keine Bauteilpartien verstopft werden. Ferner bestimmt die Schleifkörperform die Anzahl der Eingriffslinien: während kugelartige Schleifkörper dazu neigen, Grate lediglich umzubiegen, lassen sich beispielsweise mit Dreieck-Schrägschnitt-Formen gute Schleifleistungen erzielen [5]. Im Verlauf des Gleitschleifprozesses nimmt die Schleifleistung durch die eintretende Entgratung zunächst hyperbolisch ab und nähert sich dann aufgrund der eintretenden Oberflächenverbesserung asymptotisch einem Grenzwert an [4].

Gleitschleifen ist ein wirtschaftliches Entgratverfahren, das sich insbesondere zum Entgraten der Außenkonturen von Massenbauteilen eignet [3]. Neben der Gratentfernung können Kanten auch undefiniert verrundet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Werkstückoberflächen geringfügig abgetragen werden.

Kapitel 3

Laserabtragen – Stand von Wissenschaft und Technik

3.1 Einführung und Verfahrensübersicht

Für Materialbearbeitungsverfahren, die auf einem thermischen Wirkungsprinzip beruhen, lässt sich als Werkzeug prinzipiell der Laserstrahl einsetzen. Für diese Verfahren in Kombination mit unterschiedlichsten Werkstoffen steht eine Vielzahl von Lasern zur Verfügung, die sich hinsichtlich ihrer emittierten Wellenlänge, Betriebsart (gepulste oder kontinuierliche Strahlung) und Leistung unterscheiden. Industrielle Anwendung finden heute verschiedenste Verfahren, die nach DIN 8580 [17] klassifiziert werden können:

- **Trennen:** Schneiden, Bohren, Oberflächenstrukturieren, Formabtragen und Beschriften (Tiefengravur)
- **Fügen:** Schweißen, Löten
- **Stoffeigenschaft ändern:** Härten, Beschriften (Farbumschlag)

Die trennenden Laserstrahlverfahren beruhen auf dem thermischen Abtragen mit Laserstrahlung. Wie sie innerhalb der Gesamtheit der Fertigungsverfahren einzuordnen sind, ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Gemeinsame Grundlage der abtragenden Laserverfahren ist der thermisch induzierte Materialabtrag, der durch Laserstrahlung verursacht wird.

Die Erzeugung und Ausbreitung von Laserstrahlung sowie die Strahlführung und -formung ist vielfach in der Literatur beschrieben worden, so dass an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen, sondern beispielsweise an die

Werke [18, 19, 20, 21, 30] verwiesen werden soll. Zur Definition von Begriffen und Kenngrößen orientiert sich diese Arbeit an der DIN EN ISO 11145 [22].

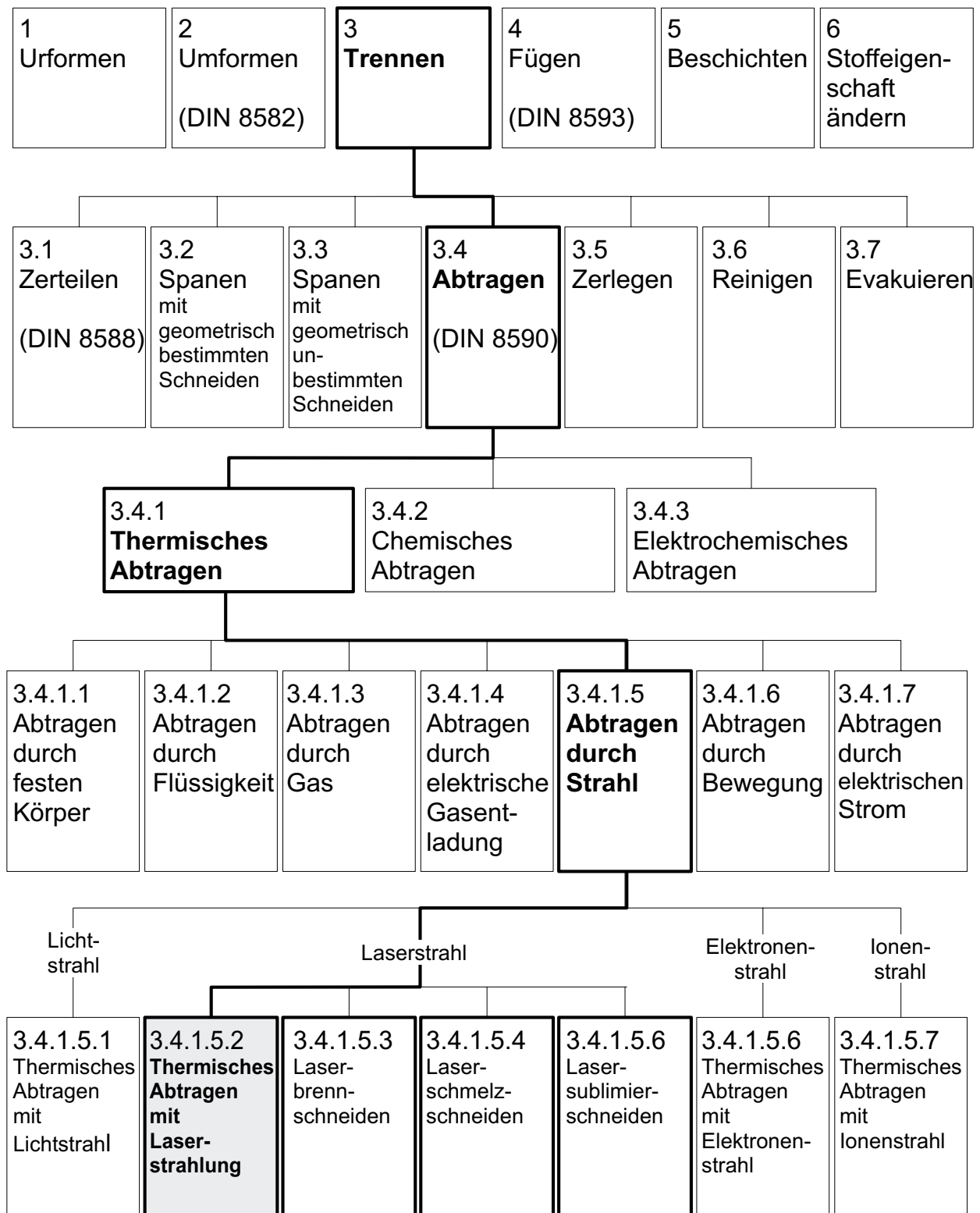


Abb. 3.1: Einordnung des Abtragens durch Laserstrahl in die Fertigungsverfahren nach DIN 8590

3.2 Prozessgrundlagen

Die Wechselwirkung zwischen Laser und Materie ist ein Prozess, der zweckmäßigerweise in fünf Teilaspekten beschrieben werden kann [30]:

- Absorption,
- Aufheizen,
- Aufschmelzen,
- Verdampfen und
- Schmelzaustrieb.

Sämtlichen Laserprozessen ist gemein, dass Laserstrahlung absorbiert wird und die so eingebrachte Energie die Wirkstelle aufheizt. Absorption und Wärmeleitung, als Grundlage für den Abtragprozess, werden daher in den folgenden Abschnitten detaillierter beschrieben, bevor der Abtragprozess im Gesamten betrachtet wird.

3.2.1 Energieeinkopplung durch Fresnelabsorption

Ein großer Anteil der auf die Werkstückoberfläche treffenden Laserstrahlung wird reflektiert, während der andere Anteil in den Körper eindringt. Der eindringende Energiefluss wird vom Werkstoff absorbiert und Wärme umgewandelt. Die Absorption im Körper beschreibt das Beersche Gesetz:

$$I(z) = I \cdot (1 - R) \cdot e^{-\alpha_A z} \quad (3.1)$$

Dabei ist I die Energieflussdichte des Laserstrahls und R der Anteil der Reflexion. Der Absorptionskoeffizient α_A berechnet sich aus der Wellenlänge λ der Laserstrahlung und den Indizes n und k des materialbezogenen komplexen Brechungsindex $N = n(1 + ik)$:

$$\alpha_A = \frac{4\pi n k}{\lambda} \quad (3.2)$$

Die senkrecht- und parallelpolarisierten Anteile der Laserstrahlung werden unterschiedlich stark absorbiert. Für einen unpolarisierten Laserstrahl ergibt sich der absorbierte Gesamtanteil¹ $A = 1 - R$ der Laserstrahlung nach Fresnel als Mittelwert beider Anteile. Mit den Brechungsindizes des Werkstoffs und

¹Abhängig vom Absorptionskoeffizienten und der Werkstückdicke kann ein Anteil der Laserstrahlung vom Werkstück transmittiert werden. Bei Stahlwerkstoffen und in dieser Arbeit betrachteten Materialdicken ist dieser Anteil jedoch null.

des Einfallswinkels α der Laserstrahlung auf die Oberfläche lässt sich A nach Gleichung 3.3 berechnen [19].

$$A(\alpha) = \frac{1}{2} \left[\frac{4n \cdot \cos \alpha}{(n^2 + k^2) \cos^2 \alpha + 2n \cdot \cos \alpha + 1} + \frac{4n \cdot \cos \alpha}{n^2 + k^2 + 2n \cdot \cos \alpha + \cos^2 \alpha} \right] \quad (3.3)$$

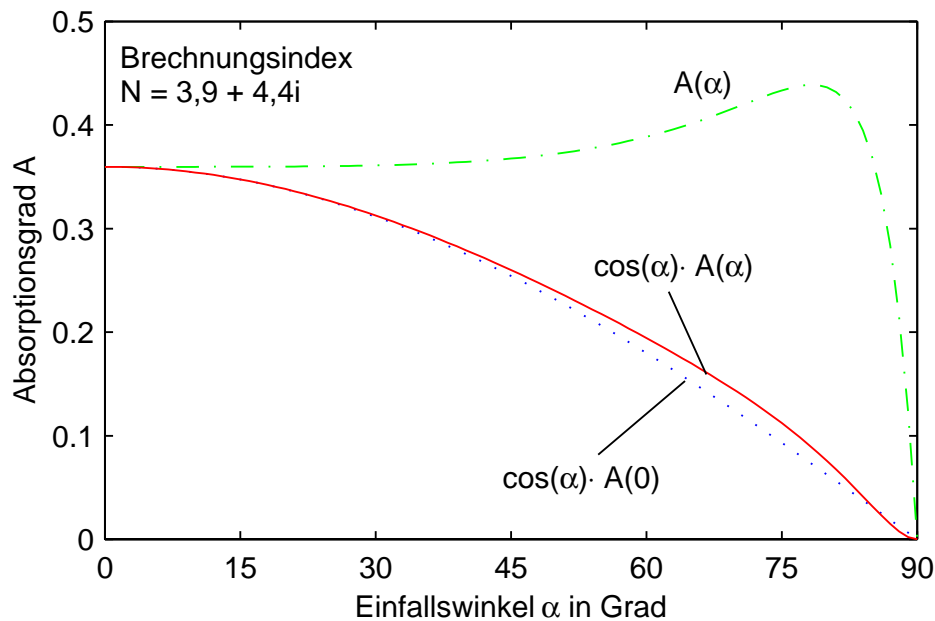


Abb. 3.2: Berechneter Absorptionsgrad über dem Einfallswinkel α für Eisen

In Abbildung 3.2 ist exemplarisch der Absorptionsgrad über dem Einfallswinkel aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist das Maximum beim sogenannten Brewsterwinkel im Bereich von 80° . Anzumerken bleibt, dass durch flache Einstrahlwinkel ($10^\circ < \alpha < 90^\circ$) die bestrahlte Fläche vergrößert und somit die beaufschlagte Intensität um den Faktor $\cos(\alpha)$ gegenüber der Intensität bei senkrechter Einstrahlung verringert wird. So kann im Bereich des Brewsterwinkels zwar die insgesamt absorbierte Energie, nicht aber die absorbierte Intensität auf ein Maximum gebracht werden.

3.2.2 Wärmeleitung im Werkstück

Die durch die absorbierte Intensität in die Wirkstelle eingebrachte Wärme verteilt sich im Werkstück aufgrund der Wärmeleitung. Zur allgemeinen Beschreibung dessen dient folgende Form der Wärmeleitungsgleichung, wobei aber Wärmeverluste in der Wirkstelle aufgrund von Konvektion und

Wärmestrahlung nicht berücksichtigt werden [19]:

$$\nabla^2 T - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{\lambda} \cdot \alpha \cdot A \cdot I(x, y, z) \cdot e^{-\alpha z} \quad (3.4)$$

Zu einem bestimmten Zeitpunkt t kann die Temperaturverteilung $T(x, y, z)$ im Werkstück berechnet werden, wobei die Temperaturleitfähigkeit κ , die Wärmeleitfähigkeit λ , der Absorptionskoeffizient α und der Absorptionsgrad A werkstoffspezifische, temperaturabhängige Konstanten und die Funktion I die zeitabhängige Intensitätsverteilung darstellen. Diese allgemeine dreidimensionale Wärmeleitungsgleichung ist aber nur in Sonderfällen lösbar, wenn sie durch Randbedingungen vereinfacht werden kann.

3.2.2.1 Abschätzung des Wärmeleitungsproblems

Inwieweit die Beschreibung der Wärmeleitung vereinfacht werden kann (in welcher Dimension die Wärmeleitungsgleichung formuliert werden muss), lässt sich anhand des Quotienten vom Fokusdurchmesser d_f und der Diffusionslänge δ abschätzen. Die Diffusionslänge ist als Maß für den zurückgelegten Weg einer Isotherme zu verstehen und berechnet sich aus der Wurzel des Produktes der Temperaturleitfähigkeit κ und der Bestrahlungsdauer t . Für den Fall eines eindimensionalen Wärmeleitungsproblems gilt folgende Forderung:

$$\frac{\delta}{d_f} \ll 1 \quad \text{mit} \quad \delta = 2\sqrt{\kappa \cdot t} \quad (3.5)$$

In Tabelle 3.1 sind einige Beispiele zur Abschätzung des Wärmeleitungsproblems berechnet worden. Bei Einsatz eines cw-Strahls ist die Bestrahlungsdauer t die Zeit zum Überstreichen des Fokusdurchmessers.² Es ist ersichtlich, dass im Kurzpulsbereich eine eindimensionale Betrachtung ausreicht, während bei Einsatz eines cw-Strahls die Wärmeleitung dreidimensional zu berechnen ist.

3.2.2.2 Temperatur auf der Werkstückoberfläche

Während der Laserbestrahlung entstehen auf der Werkstückoberfläche in der Strahlachse die höchsten Temperaturen. Weist die Laserstrahlung eine gaussförmige Intensitätsverteilung mit der Spitzenintensität I_0 und dem Durchmesser d_f auf, ergibt sich aus der dreidimensionalen Wärmeleitungsgleichung folgende Lösung, mit der die Temperatur T zeitabhängig berechnet werden kann [19]:

$$T(0, t)_{\text{Gauss}} = A \cdot I_0 \frac{d_f}{2\lambda\sqrt{2\pi}} \cdot \arctan \left(\frac{4\sqrt{2\kappa t}}{d_f} \right) \quad (3.6)$$

²In der Tabelle wurde eine Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s zugrunde gelegt.

Temperatur- leitfähigkeit	κ [m ² /s]	Ferritischer Stahl (St 37)			Austenitischer Stahl		
		1,16 e-5			5,75 e-6		
		Markierl.	Kurzpuls	CW	Markierl.	Kurzpuls	CW
Pulslänge (Bestrahlungsdauer)	τ_p [s]	3 e-7	2 e-8	2 e-2	3 e-7	2 e-8	2 e-2
Diffusionslänge	δ [μ m]	3,73	0,96	963,20	2,63	0,68	678,09
Fokusburchm.	d_f [μ m]	80,00	40,00	200,00	80,00	40,00	200,00
Verhältnis	δ/d_f	0,05	0,02	4,82	0,03	0,02	3,39

Tab. 3.1: Abschätzung der Wärmeleitungsbeschreibung für Stahlwerkstoffe

Anhand von Gleichung 3.6 kann mit vorgegebenen Werten von Zeit und Fokusburchmesser die zum Verdampfen erforderliche Intensität abgeschätzt werden. Abbildung 3.3 zeigt für verschiedene Bestrahlungsdauern t die erforderliche Intensität I_0 in Abhängigkeit des Fokusburchmessers d_f . In der Abbildung ist zu erkennen, dass bei kurzen Bestrahlungsdauern ($t < 100$ ns) mit hohen Intensitäten die Größe des Fokusburchmessers nahezu keinen Einfluss auf das Erreichen der Verdampfungstemperatur hat. Die in Abschnitt 3.2.2.1 getroffene Aussage, dass die Wärmeleitung bei kurzen Pulsen und hohen Intensitäten eindimensional betrachtet werden kann, spiegelt sich in den dreidimensional berechneten Ergebnissen wieder.

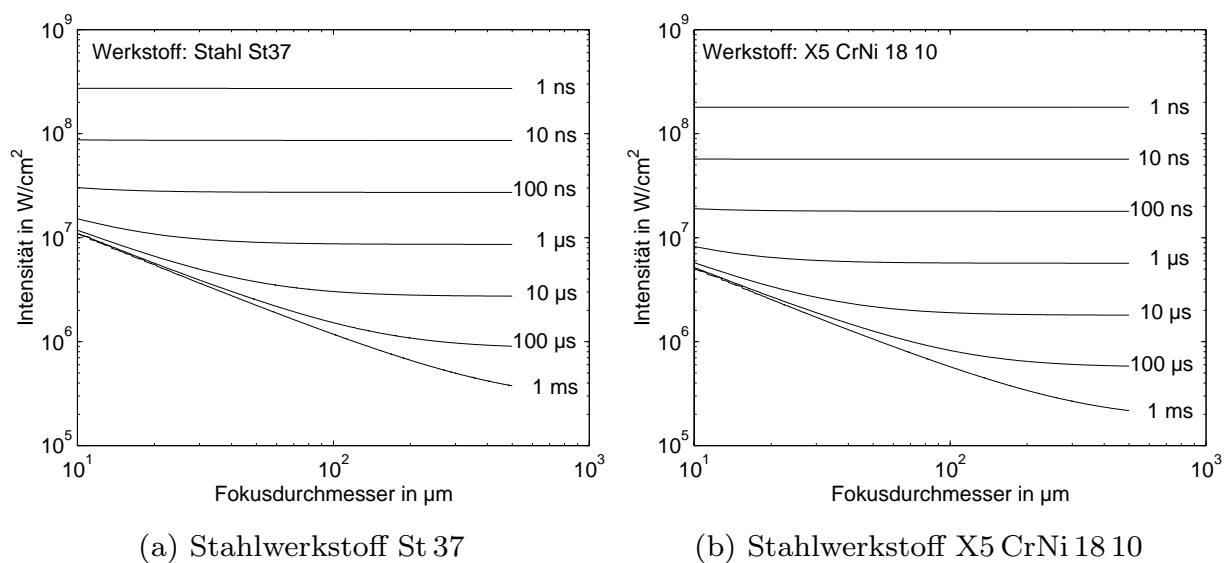


Abb. 3.3: Erforderliche Intensität zum Erreichen der Verdampfungstemperatur auf der Werkstückoberfläche in der Strahlachse in Abhängigkeit des Fokusburchmessers und der Bestrahlungsdauer

3.2.2.3 Wärmeleitung im halbunendlichen Körper

Um den Materialabtrag abschätzen zu können, bedarf es der Betrachtung des Temperaturprofils innerhalb des Materials. In Bezug auf die Wärmeleitungsgleichung kann ein halbunendlicher Körper betrachtet und ein rotationsymmetrisches Problem formuliert werden. Bei einem unendlichen großen Strahldurchmesser lässt sich ferner die Randbedingung postulieren, dass in radialer Richtung keine Wärmeleitung auftritt ($\partial T / \partial r = 0$), so dass sich zur Beschreibung der zeitabhängigen Temperaturverteilung T in Richtung der Körpertiefe z folgende Lösung ergibt [19]:

$$T(z, t)_{d_f=\infty} = \frac{A \cdot I_0}{\lambda} \cdot \left\{ 2\sqrt{\kappa t} \cdot \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}}\right) - \frac{1}{\alpha} e^{-\alpha z} + \frac{1}{2\alpha} e^{\alpha^2 \kappa t} \right. \\ \left. \times \left[e^{-\alpha z} \cdot \operatorname{erfc}\left(\alpha\sqrt{\kappa t} - \frac{z}{2\sqrt{\kappa t}}\right) + e^{\alpha z} \cdot \operatorname{erfc}\left(\alpha\sqrt{\kappa t} + \frac{z}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right] \right\} \quad (3.7)$$

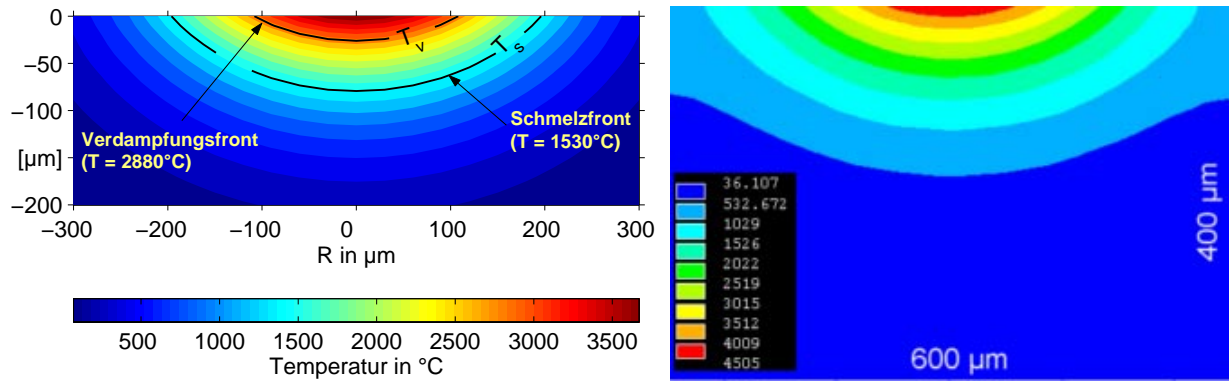
In Gleichung 3.7 wird die Eindringtiefe des Lichtes in den Körper berücksichtigt. Da aber bei Metallen die Absorptionskoeffizienten α in der Größenordnung von 10^7 gegenüber der Diffusionslänge δ wesentlich größer sind, kann Gleichung 3.7 auf folgende Form reduziert werden:

$$T(t, z)_{d_f=\infty} = \frac{A \cdot I_0}{\lambda} \cdot 2\sqrt{\kappa t} \cdot \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \quad (3.8)$$

Im realen Fall eines endlich ausgedehnten Laserstrahls muss in der Wärmeleitungsgleichung ein Wärmefluss in radiale Richtung zugelassen werden. Für die Bestrahlung mit einem Laserstrahl mit gaussförmiger Intensitätsverteilung und dem Durchmesser d_f hat Duley [24] folgende dreidimensionale Lösung der Wärmeleitungsgleichung formuliert:

$$T(r, z, t)_{\text{Gauss}} = A \cdot I_0 \cdot \frac{d_f^2}{\lambda} \sqrt{\frac{\kappa}{\pi}} \cdot \int_0^t \frac{r(t-t')}{\sqrt{t'} \cdot (4\kappa t' + d_f^2)} \cdot e^{\left[\frac{-z^2}{4\kappa t'} - \frac{r^2}{4\kappa t' + d_f^2}\right]} \cdot dt' \quad (3.9)$$

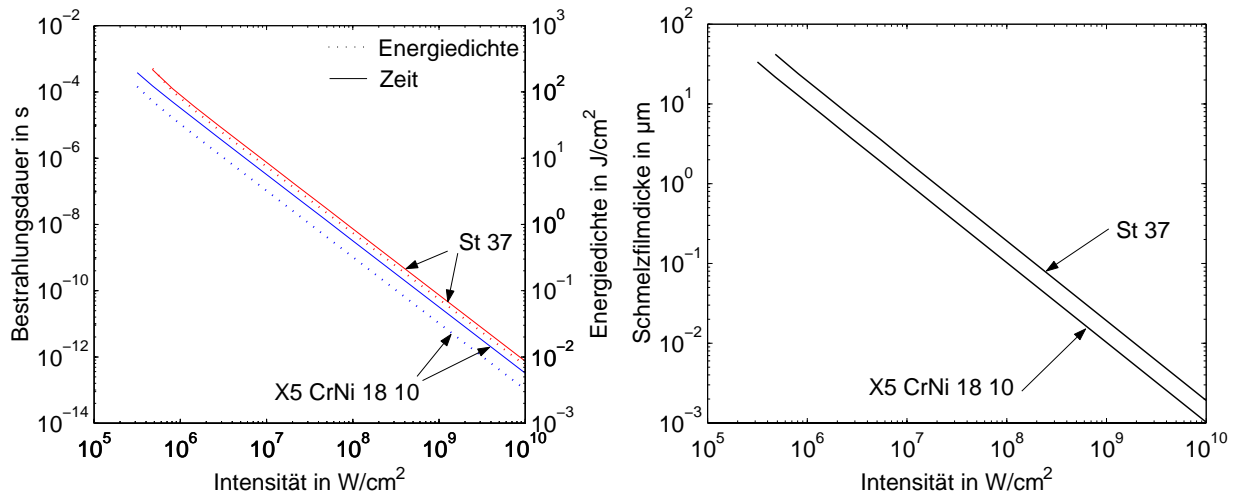
Das Integral in Gleichung 3.9 ist analytisch nicht lösbar, so es dass numerischer Methoden zur Berechnung bedarf. Abbildung 3.4 zeigt Simulationsergebnisse des analytischen, dreidimensionalen Modells nach Gleichung 3.9 (Abb. 3.4a) und eines zweidimensionalen FEM-Modells (Abb. 3.4b) für das Bestrahlen eines halbunendlichen Körpers. Am Ergebnis der FEM-Simulation zeigt sich die Auswirkung des räumlich begrenzten Körpers auf das Temperaturprofil im Gegensatz zum halbunendlich ausgedehnten Körper. Die Differenz der berechneten Maximaltemperaturen beruht auf dem Unterschied zwischen der 2D- und 3D-Modellierung.



(a) Analytische Berechnung mit 3D-Modell nach Gl. 3.9 (Halbunendlich ausgedehnter Körper)

(b) FEM-Simulation mit 2D-Modell (Räumlich begrenzter Körper: $600 \times 400 \mu\text{m}$)

Abb. 3.4: Simulierte Temperaturprofile für die Laserbestrahlung eines halbunendlichen Körpers. Materialkennwerte für Stahlwerkstoff St 37, Fokussdurchmesser $d_f = 500 \mu\text{m}$, Intensität $I_0 = 5,1 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$, Bestrahlungsdauer $t = 1 \text{ ms}$.



(a) Erforderliche Bestrahlungsdauer t_v und Energiedichte H zum Erreichen der Verdampfungstemperatur T_v auf der Werkstückoberfläche in Abhängigkeit der Intensität

(b) Resultierende Schmelzfilmdicke beim Erreichen der Verdampfungstemperatur T_v auf der Werkstückoberfläche

Abb. 3.5: Auswirkung der Intensität auf das Aufheizen bis zum Verdampfen. Berechnungsgrundlage: Gleichungen 3.6 u. 3.9 mit Materialkennwerten für die Stahlwerkstoffe St 37 und X5 CrNi 18 10.

Mit Gleichung 3.6 können bei vorgegebenen Werten von Intensität und Fokussdurchmesser die erforderlichen Bestrahlungsdauern t_v bis zum Verdampfen (Abb. 3.5a) ermittelt werden. Zu diesem Zeitpunkt t_v lässt sich dann die maximale Schmelzfilmdicke bestimmen, indem anhand des berechneten Temperaturprofils im Körper der Abstand der Schmelzfront zur Verdampfungsfrent bestimmt wird. Da sich die Laserpulslänge auf die Energieein-

kopplung der Laserstrahlung in den Werkstoff auswirkt, ist Gleichung 3.6 nach derzeitigem Prozessverständnis aber nur bei Pulslängen oberhalb der Größenordnung von 10 ps gültig [41, 42, 43, 44, 45].

Berechnete Schmelzfilmdicken zum Zeitpunkt t_v zeigt Abbildung 3.5b. Der logarithmische Zusammenhang zwischen der vorgegebenen Intensität und der benötigten Zeit t_v zum Erreichen der Verdampfungstemperatur an der Oberfläche ist ersichtlich. Je höher die Intensität ist, desto kleiner wird die Schmelzfilmdicke; dieses ist leicht vorstellbar, da der induzierte Temperaturgradient bei hohen beaufschlagten Intensitäten dementsprechend groß wird. Ebenfalls in Abbildung 3.5a ist die Energiedichte aufgetragen, die bei gegebener Intensität zum Erreichen der Verdampfungstemperatur erforderlich ist. Danach ist es energetisch günstiger, mit hohen Intensitäten zu arbeiten, da so anteilig weniger Wärmeleitungsverluste auftreten.

3.2.3 Laserinduziertes Verdampfen

Abbildung 3.6 zeigt schematisch die wichtigsten Prozesse und Phänomene beim Laserabtragen. Das Aufheizen des Werkstoffs führt erst dann zu einem Abtrag, wenn die Verdampfungstemperatur an der Oberfläche überschritten wird. Dann verdampft Material, und Teile der schmelzflüssigen Phase werden ausgetrieben [27]. Wester [28] beschreibt die Verdampfung als einen thermischen Nichtgleichgewichtsprozess. Anhand kinetischer Modelle können Abdampftrate, Dampfdichte und -geschwindigkeit als Funktion der Oberflächentemperatur beschrieben werden. Der resultierende Dampfdruck über der Wirkstelle hängt exponential von der Intensität ab [28] und spielt eine entscheidene Rolle für den Abtragprozess, weil der Schmelzaustrieb bei Metallen ein druckgesteuerter Prozess ist [29]. Sehr starkes Verdampfen führt zur Bildung einer Stoßwelle, die eine dreidimensionale Druckverteilung bewirkt.

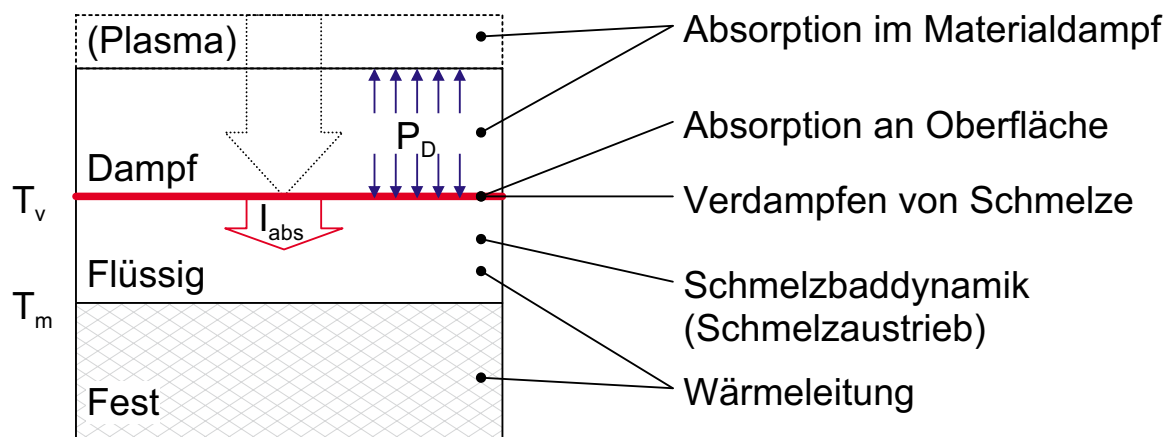


Abb. 3.6: Schema des laserinduzierten Abtrags mit beteiligten physikalischen Prozessen

Die Auswirkung der Intensität auf den Abtrag ist somit in mehrfacher Hinsicht zu betrachten. Je höher die absorbierte Intensität ist, desto größer ist der Temperaturgradient im Werkstoff. Dies bewirkt zunächst dünnere Schmelzfilmdicken beim Erreichen der Verdampfungstemperatur und minimiert die Wärmeleitungsverluste (siehe vorheriger Abschnitt). Außerdem steigt die Abdampftrate und somit der Dampfdruck. Je höher wiederum der Dampfdruck ist, desto stärker wird die Schmelze aus der Wirkstelle ausgetrieben. Die eingestrahlte Intensität wird aber auch teilweise vom Materialdampf über der Wirkstelle absorbiert. Je dichter der Materialdampf wird, desto stärker absorbiert er auch Laserstrahlung, so dass sich bei höheren Intensitäten ein Plasma bilden kann. Wenn das Plasma dicht an der Werkstückoberfläche bleibt, kann letztlich mehr Energie in das Werkstück eingekoppelt werden; ansonsten treten Abschirmeffekte auf [27]. So hatte bereits 1978 von Allmen [26] vorgeschlagen, die Intensität nur so groß zu wählen, dass kein Plasma erzeugt wird. Zusammenfassend unterscheiden Mayerhofer et al. [31, 37, 38] zum Abtragen drei Intensitätsbereiche:

Bereich I: mit geringen Intensitäten, so dass nur reines Verdampfen eintritt.

Bereich II: mit ausreichendem Dampfdruck, so dass Schmelze ausgetrieben wird.

Bereich III: mit so hohen Intensitäten, so dass die Abtragsättigungsgrenze erreicht wird und Abschirmeffekte des laserinduzierten Plasmas auftreten.

Beim Abtragen im Bereich II und III entstehen am Rande des Abtragbereichs Aufwürfe, die durch den Schmelzaustrieb verursacht werden. Beim Verdampfen entsteht ein Druck, der auf die Schmelze einwirkt und eine Strömung radial nach außen bewirkt [34]. Nach Matsunava et al. [33] ist beim Laserbohren diese Rückstoßkraft durch die Metallverdampfung die entscheidende Kraft für die Ausbildung der Schmelzbadströmung.

Nach Modellen, die den Zusammenhang zwischen absorbierter Intensität, Dampfdruck und Geschwindigkeit des abdampfenden Materials beschreiben, steigt der Dampfdruck mit zunehmender Intensität [35, 36]. So nimmt mit steigender Intensität der Schmelzaustrieb zu. In experimentellen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass sich die Aufwürfe verringern, wenn die Energiedichten reduziert werden [29]. Durch reduzierte Energiedichten sinkt aber wiederum die Abtragsrate. Somit ist es nach derzeitigem Kenntnisstand nicht möglich, maximale Abtragsraten ohne Aufwürfe zu erzielen.

Auch beim Abtragen mit Kurzpulsen ($\tau_H=15\text{ ns}$) entstehen nach Simulationen von Murayama et al. [34] Randaufwürfe. Am Beispiel von Aluminium

wird gezeigt, dass der Randaufwurf hauptsächlich nach dem Laserpuls entsteht. Denn nach dem Pulsende sinkt der Dampfdruck schneller als die nach außen gerichtete Strömungsgeschwindigkeit in der Schmelze, so dass innerhalb von 20 bis 30 ns ein Randaufwurf gebildet wird.

Schmelzeffekte beim Laserabtragen wie Aufwurfbildung sowie Kantenabrundung beeinflussen die Strukturgenauigkeit und das Abtragergebnis [39]. Deswegen wird für eine hohe Präzision ein großer Verdampfungsanteil des Abtrags angestrebt [40, 50], der wiederum mit hohen Intensitäten bei kurzen Pulslängen erreicht werden kann. Deswegen haben sich verschiedene Arbeiten mit dem Abtragen durch Pulslängen im Pico- und Femtosekundenbereich befasst. Nach Krüger et al. [46] minimieren Subpicosekundenpulse die Wärmeeinflusszone zu einigen Nanometern. Während Menschig et al. [45] bei Pulslängen unter einer 1 ps sogar einen kontrollierten Abtrag ohne Schmelzenbildung bzw. Aufwürfe [49] beobachten, erkannten Franz et al. [47, 48] beim Bohren im Picosekundenbereich aber Wärmeeinflusszonen im Bereich von 5 bis 10 μm .

3.2.4 Reaktives Abtragen – Laserspanen

Das reaktive Abtragen beruht auf dem Oxidieren beziehungsweise Verbrennen des Werkstoffs. Da bei der Bearbeitung Oxidspäne entstehen, wird es in der Literatur auch als Laser- oder Oxidspanen bezeichnet. Abbildung 3.7 zeigt die am Laserspanen beteiligten physikalischen Prozesse.

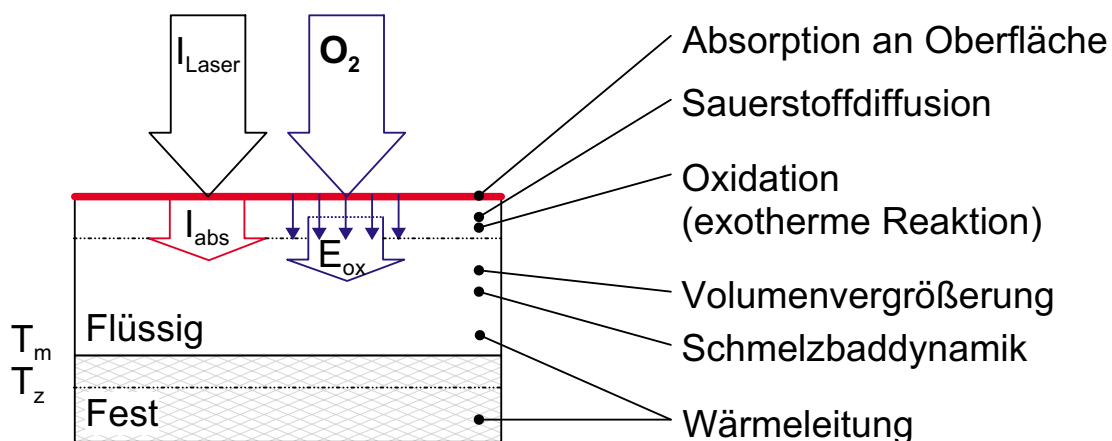


Abb. 3.7: Schema des Laserspanens mit beteiligten physikalischen Prozessen

Schubart [51] unterteilt das Oxidspanen vom zeitlichen Ablauf her in drei Abschnitte:

Initiierungsphase: Durch die Laserstrahlung heizt sich zunächst die Wirkstelle auf. Wird im Werkstoff die Zündtemperatur³ T_z erreicht, setzt

³bei Stahlwerkstoffen in der Größenordnung von 700°C

zwischen Werkstoff und Sauerstoff eine exotherme Verbrennungsreaktion ein. Dadurch wird zunächst der Absorptionsgrad sprunghaft erhöht, so dass Oxid und Grundwerkstoff aufschmelzen. Ferner trägt die freiwerdende Verbrennungsenergie im weiteren Prozessverlauf neben der Laserstrahlenergie zur Aufheizung bei.

Verbrennungsphase: Die Oxidation erfolgt nun aus dem flüssigen Zustand der Schmelze, wobei die Phasengrenze fest-flüssig der Verbrennungsphase aufgrund der Wärmeleitung vorausseilt. Untersuchungen von Eberl et al. haben gezeigt, dass die Sauerstoffdiffusion gegenüber der Materialerhitzung den prozesslimitierenden Faktor darstellt [52]. Aufgrund der Oxidation vergrößert sich im Reaktionsbereich das Werkstoffvolumen bis zum zweifachen [52].

Spanablösephase: Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Dehnungen zwischen oxidiertem und erstarrter Schmelze (Schlacke) und festem Grundmaterial entstehen bei der Abkühlung Spannungen. Wenn die Schrumpfkraft die Adhäsionskräfte übersteigen, kommt es zur selbstständigen Spanablösung, wobei die Spanbiegung vom Temperaturgradienten im Span abhängt.

Die chemische Zusammensetzung eines Werkstoffs spielt für das Laserspannen eine entscheidende Rolle, da nur oxidierbare Stähle mit diesem Verfahren bearbeitbar sind. Hochlegierte, nichtrostende Stähle können deswegen durch Laserspannen nicht abgetragen werden. Nach Sutor [53] wird die erzielbare Oberflächenqualität nur unwesentlich, die realisierbaren Abtragraten aber sehr stark (bis zu 400 %) von der Werkstoffzusammensetzung beeinflusst. Insbesondere große Kohlenstoffgehalte ermöglichen hohe Abtragraten [55, 56].

Charakteristisch für das Laserspannen ist, dass keine Schmelze ausgetrieben wird und somit Aufwürfe und Niederschläge vermieden werden [57]. Durch einen Schmelzaustrieb wird aber auch die Oxidschicht an der Oberfläche entfernt, so dass einerseits der Absorptionsgrad reduziert und andererseits der Verbrennungsvorgang in der Form beeinflusst wird, dass der Prozess seine Stabilität verliert und die Spanbildung behindert wird. Um Schmelzaustrieb zu verhindern, sind zwei Aspekte zu berücksichtigen:

- Die kinetische Energie des Prozessgasstrahls darf nur so groß sein, dass durch den Gasstrahl noch keine Schmelze ausgeblasen wird [81]. Deswegen wird beim Laserspannen mit geringen Gasdrücken gearbeitet.
- Intensität und Energie müssen so gering sein, dass die Verdampfungstemperatur nicht erreicht wird und kein Dampfdruck über der Wirkstelle entsteht.

Für das Laserspanen ergibt sich insgesamt ein enges Prozessfenster. Denn Laserstrahlintensität und Vorschub (Bestrahlungsdauer) müssen so abgestimmt sein, dass zumindest die Schmelztemperatur erreicht nicht aber die Verdampfungstemperatur überschritten wird.

3.3 Laserabtragverfahren

Das thermisch induzierte Abtragen mit Laserstrahlung lässt sich in drei Wirkmechanismen untergliedern:

- **Schmelzaustrieb:** Austreiben von aufgeschmolzenem Material mit einem Gasstrahl oder durch prozessinduziertem Dampfdruck,
- **Sublimieren** – Verdampfen: Erhitzen des Materials oberhalb der Verdampfungstemperatur und
- **Reaktives Abtragen** – Laserspanen: Oxidieren des Materials so dass sich selbstablösende Oxidschichten bilden.

Von den Wirkmechanismen lassen sich die grundlegenden Laserabtragverfahren ableiten, die in Abbildung 3.8 im Überblick dargestellt sind. Das Laserspanen stellt aufgrund der Spanablösung ein eigenständiges Abtragverfahren dar. Sublimieren und Schmelzaustrieb dagegen stehen bei Stahlwerkstoffen im Zusammenhang, da sich in Metallen beim Erhitzen auf Verdampfungstemperatur immer eine Schmelzphase ausbildet, so dass durch den entstehenden Verdampfungsdruck Schmelze ausgetrieben wird. Aufgrund der Größenunterschiede der erzielbaren Abtragraten unterscheidet Schubart [51]

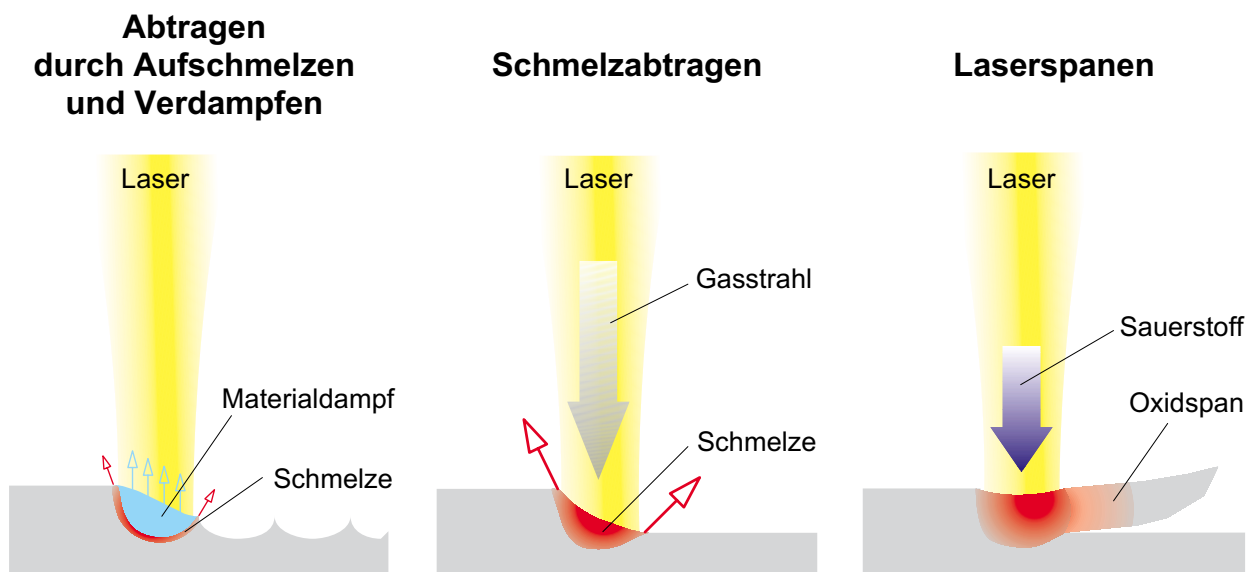


Abb. 3.8: Grundlegende Verfahren zum Laserstrahlabtragen

übergreifend in Makro- und Mikroabtrag. Demnach umfasst Makroabtragen das Laserspanen und das Abtragen mit Schmelzaustrieb durch Prozessgas, während Mikroabtragen auf dem laserinduzierten Verdampfen basiert.

Wie die eingangs in Kapitel 3.1 genannten abtragenden Laserverfahren parameterbezogen zusammenhängen zeigt Abbildung 3.9. Die Komplexität eines Verfahrens steigt dabei mit der Anzahl der prozessrelevanten Parameter.

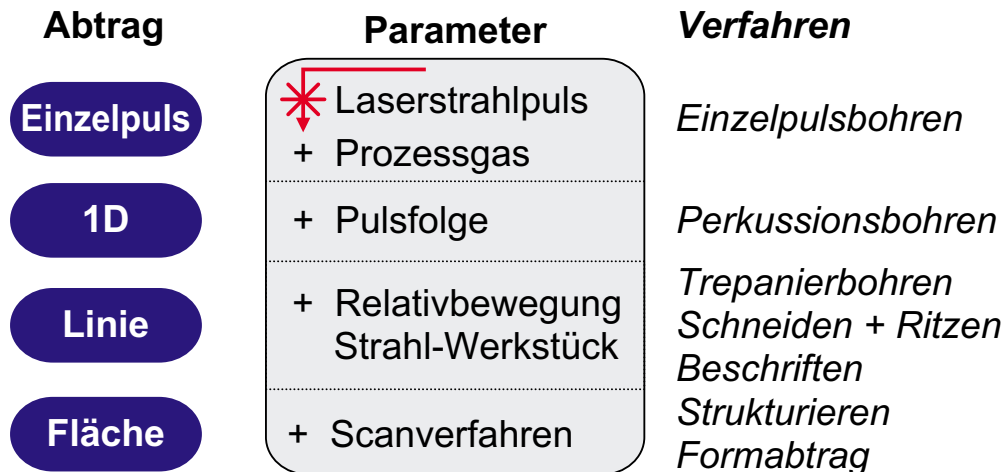


Abb. 3.9: Klassifizierung abtragender Laserverfahren bezüglich Abtraggeometrie-relevanter Parameter

3.3.1 Eindimensionale Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück

Um mehr als nur eine Bohrung abzutragen, muss der Laserstrahl relativ zum Werkstück bewegt werden. Aufgrund des erfolgenden Materialabtrags ergibt sich dann in der Wirkstelle eine Schräge mit dem Winkel φ , wie in Abbildung 3.10 skizziert. Je kleiner der Vorschub ist, desto größer wird sowohl die Abtragtiefe a als auch der Winkel φ der Schräge. Dadurch vergrößert sich die Oberfläche in der Wirkstelle, so dass sich die beaufschlagte Intensität verringert und im Extremfall unterhalb der zum Abtragen erforderlichen Schwellintensität liegt.

In Abbildung 3.10 sind Kennwerte zur Beschreibung des Vorschubs eingezeichnet. Ausgehend von einem gepulsten Laserstrahl mit der Repetitionsrate f_p und dem Fokusbereich d_f kann bei bekanntem Vorschub v der Pulsüberlapp u nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$u_f = \frac{d_f - \Delta p}{d_f} \quad \text{mit} \quad \Delta p = \frac{v}{f_p}. \quad (3.10)$$

Der Fokusbereich d_f entspricht im Allgemeinen nicht dem Durchmesser

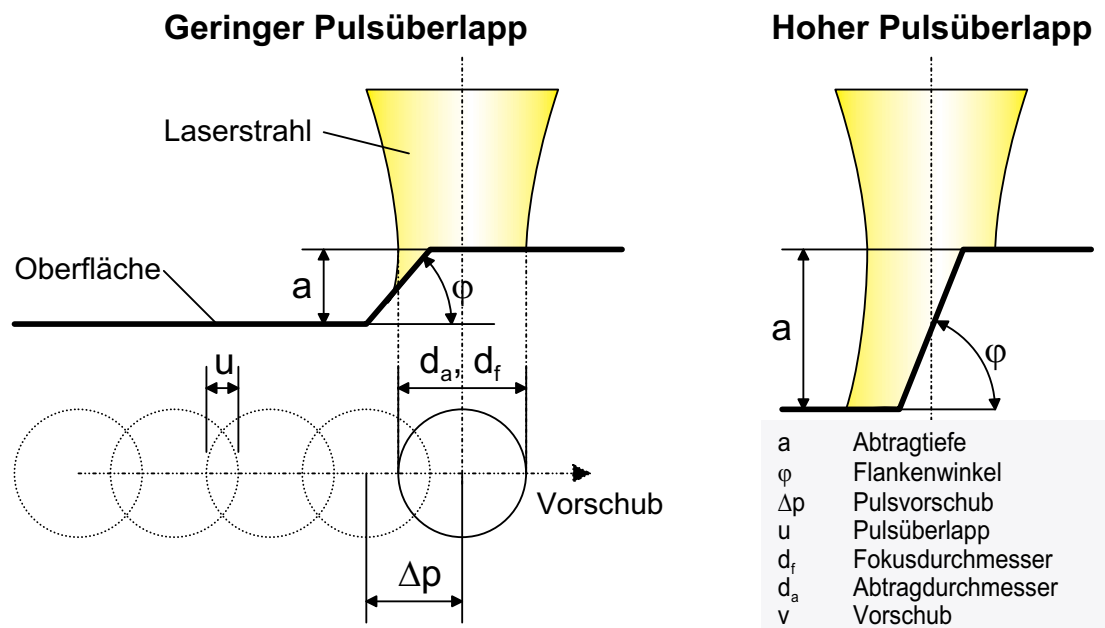


Abb. 3.10: Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück

des Abtrags pro Puls d_a . Deswegen wird zwischen abtrag- und fokusbezogenen Pulsüberlapp u_a und u_f unterschieden.

Aufgrund eines erhöhten Pulsüberlapps wird mehr Energie eingebracht, so dass die Abtragtiefe ansteigt. Dadurch wird die von der Laserstrahlung beaufschlagte Fläche vergrößert und somit die absorbierte Intensität verringert. Wie in Kapitel 3.2.2.3 erläutert, entsteht dann mehr Schmelze in der Wirkstelle. Ab 80 % Pulsüberlapp wurde in Versuchen ein deutlicher Anstieg der Oberflächenrauigkeit festgestellt [60, 61], der auf den erhöhten Schmelzaustrieb zurückzuführen ist. Wenn sich bei hohen Vorschüben die einzelnen Pulse nicht mehr so stark überlappen, steigt die Oberflächenrauigkeit ebenfalls. Läßiger [62] zeigt mit seinen Versuchen, dass unter 25 % Pulsüberlapp die Oberflächenrauigkeit wiederum ansteigt.

3.3.2 Flächiges Abtragen

Um eine Kavität abzutragen oder eine Oberfläche zu strukturieren, können entweder Maskenabbildungsverfahren eingesetzt oder beim „Direktschreiben“ viele Bearbeitungsspuren aneinander gelegt werden, was als Scannen bezeichnet wird. Während beim Abtragen mit Excimerlasern in der Regel die Maskenabbildung eingesetzt wird, liegt beim Abtragen mit Nd:YAG-Lasern der Schwerpunkt auf dem Scan-Verfahren. Die Bearbeitungsspuren können beim Scannen in sehr unterschiedlicher Weise angeordnet werden, wobei zwischen folgenden Strategien unterschieden wird (Abbildung 3.11 zeigt einige Beispiele):

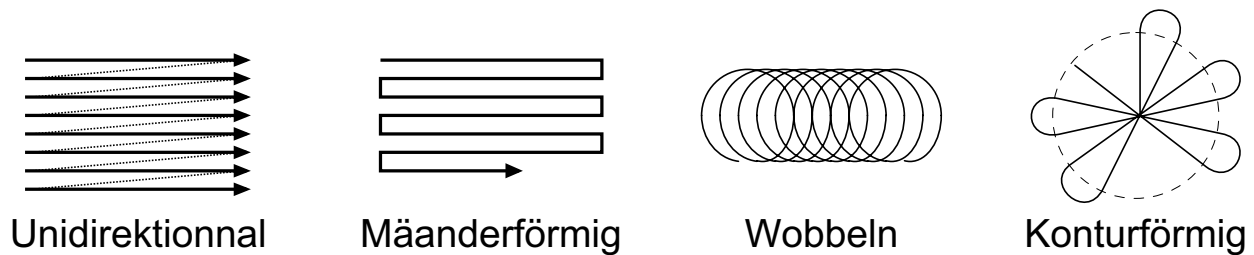


Abb. 3.11: Strategien zum Abscannen eines Arbeitsbereiches

- Uni- und bidirektional
- Mäanderförmig
- Konturparallel (zur Außenkontur)
- Spezielle Anwendungen

Das Abscannen erfordert dynamische Positioniersysteme oder eine der Bahngeschwindigkeit angepasste Laserleistung, weil sich sonst in den Umkehrpunkten ein verstärkter Abtrag ergibt [62]. Um hohe Beschleunigungen zu erzielen, werden bevorzugt Systeme eingesetzt, die auf Basis schwenkbarer Spiegel aufgebaut sind. Über diese Spiegel wird der Laserstrahl geführt, so dass er anhand der Spiegelstellung positioniert wird. Der prinzipielle Aufbau eines Scanners ist in Abbildung 3.12 skizziert.

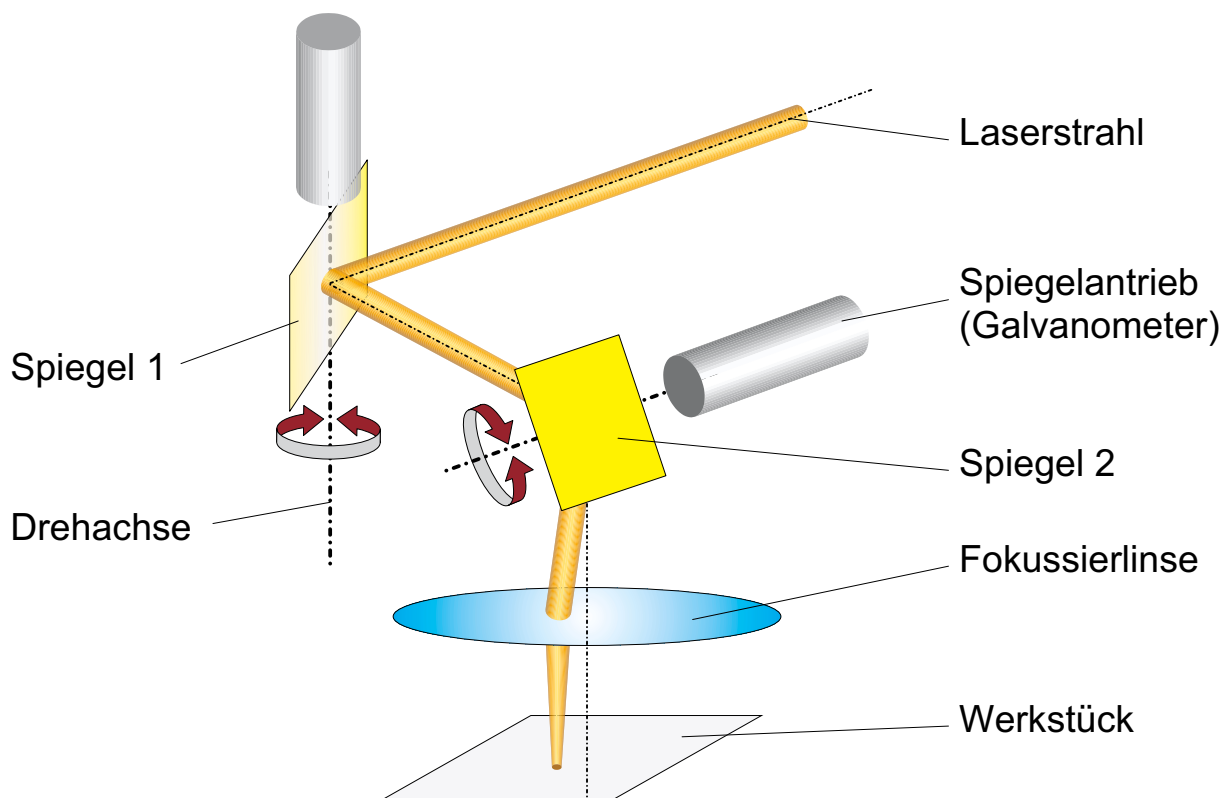


Abb. 3.12: Prinzipieller Aufbau eines Spiegel-Scannersystems

Zum Abscannen ist neben dem Pulsüberlapp u auch der Abstand der Bearbeitungsspuren zueinander ein wichtiger Parameter. Der Spur- bzw. laterale Überlapp wird analog zum Pulsüberlapp nach Gleichung 3.10 definiert. Um geforderte Strukturtiefen zu erreichen, muss die Kontur gegebenenfalls mehrfach abgescannt werden.

3.3.3 Realisierte Anwendungen zum Laserabtragen

Entsprechend der Unterteilung in Makro- und Mikroabtrag kann auch die Anwendung des Laserabtragens in zwei Schwerpunkte gegliedert werden:

- Makroskopische Bearbeitung von Hartmetallen und Keramiken sowie
- Erzeugen von kleinen Strukturen zur Oberflächenstrukturierung.

Die erste bekannte Umsetzung in eine Laserabtragmaschine beruht auf dem Abtragen durch Ausblasen der Schmelze. Dabei können Abtragraten bis zu $800 \text{ mm}^3/\text{min}$ erreicht werden [63, 64, 65]. Da allgemein hohe Abtragraten mit hohen Oberflächenrauheiten einhergehen [66, 67], können über die Verfahrensparameter Schrupp- oder Schlichtbearbeitungen eingestellt werden [62, 68, 69]. In der Fertigung von Formen und Gesenken kann das Laserabtragen durch Laserschmelzabtragen und Laserspanen wirtschaftlich eingesetzt werden [70].

Um Oberflächen zu strukturieren und insbesondere um kleine Strukturen zu erzeugen, muss ein lokal begrenzter Abtrag erfolgen. Dieses wird zunächst durch kleine Foki und TEM₀₀-Strahlprofile erreicht [58, 59]. Zudem lassen sich mit hohen Intensitäten bessere Ergebnisse in Hinsicht der Oberflächenqualität erzielen [66], so dass schwerpunktmäßig gütegeschaltete Nd:YAG-Laser eingesetzt werden [40]. Ferner muss für gute Oberflächenqualitäten unter der theoretisch möglichen Abtragate gearbeitet werden [67, 69], so dass nur geringe Abtragraten unter $1 \text{ mm}^3/\text{min}$ realisierbar sind [71].

3.4 Stand des Laserentgratens

Mit einem Laserstrahl Kanten zu entgraten, ist bereits 1976 technisch umgesetzt worden [72]. Heute wird der Laserstrahl weiterhin als Möglichkeit zum Entgraten gesehen [4, 90]. Aber es sind nur wenige Arbeiten bekannt, die sich allgemein mit dem Laserentgraten befassen. Vielmehr wird der aktuelle Stand der Technik zum Laserentgraten durch anwendungsbezogene Verfahrensentwicklungen geprägt, die in Form von Patenten publiziert wurden.

3.4.1 Differenzierung von Laserentgratverfahren

Die ersten allgemeinen Grundlagen zum Laserentgraten wurden 1983 von Butz erarbeitet. In seiner Arbeit [74] unterscheidet er grundsätzlich drei verschiedene Prozessmechanismen, Grate mittels Laserstrahlung zu entfernen:

1. Entfernung des Grates durch Umschmelzen: der Grat wird mittels des Laserstrahls unter Schutzgas umgeschmolzen und bleibt als Wulst an der Kante.
2. Entfernung des Grates durch Schneiden: mit Hilfe von Sauerstoff wird der Grat durch den Laserstrahl abgetrennt. Dabei wird das Material teilweise vom Strahl verdampft und andernteils vom Sauerstoff verbrannt.
3. Entfernung des Grates mit höchster Leistungsdichte: der Grat wird mit Hilfe des Laserstrahl soweit erhitzt, dass er verdampft. Der Materialdampf wird durch einen Prozessgasstrahl aus dem Bearbeitungsreich ausgetrieben.

Das Laserspanen, welches erst seit den neunziger Jahren bekannt ist, kann auch zum Entgraten eingesetzt werden [80, 81, 82, 83], so dass ein vierter Prozessmechanismus zum Laserentgraten zur Verfügung steht:

4. Oxidieren des Grates: durch die Laserstrahlung wird der Grat erhitzt und mit zugeführtem Sauerstoff oxidiert, so dass sich der Grat als Oxidsplan von der Kante abhebt.

Anhand von Versuchen zum Entgraten einer Bohrung zeigt Butz [74] Eignungsschwerpunkte der Verfahren auf: so bietet sich das Abschmelzentgraten an, wenn der Laserstrahl parallel zur Bohrungsachse eingestrahlt wird. Große Grate (Grathöhe $h > 2$ mm und Gratsbreite $b > 0,1$ mm) werden so aber nicht vollständig entfernt, so dass Restgrate an der Bohrungskante verbleiben. Beim Laserschneidentgraten können unter bestimmten Einstrahlwinkeln alle Grate rückstandslos entfernt werden. Allerdings tritt dann eine starke

Verschmutzung umliegender Bauteilbereiche durch Ablationsprodukte auf. Beim Entgraten mit höchster Leistungsdichte, so dass der Grat verdampft wird, ist eine hohe Positioniergenauigkeit des Strahls zur Kante erforderlich. Neben dem Prozessmechanismus können nach [76] drei Varianten hinsichtlich der Führung des Laserstrahls zur entgratenden Kante unterschieden werden, deren Eignungsschwerpunkte aber nicht aufgezeigt werden:

- Der gesamte gratbehaftete Bereich des Werkstücks wird mit dem Strahl simultan überdeckt,
- der gratbehaftete Bereich wird mit dem Strahl zeilenweise überstrichen (also abgescannt)
- oder der Strahl wird entlang der gratbehafteten Kante geführt.

3.4.2 Wichtige Prozessparameter

Für das Entgraten von Bohrungen mit Laserstrahlung sind nach Butz [74] folgende Parameter von Bedeutung:

- Laserleistung,
- Vorschubgeschwindigkeit,
- Fokusslage,
- Winkelstellung des Laserstrahls zur Kante (untergliedert in Einfallswinkel und Anstellwinkel),
- seitlicher Strahlversatz von der Bohrungskante und
- Prozessgase sowie Düsenabstand und Gasdruck.

Ergänzend zu den laserstrahlspezifischen Parametern und dem Prozessgas-einfluss sind die Winkelstellung und der seitliche Strahlversatz zur Kante spezifische Parameter des Laserentgratens. Doch auch die Geometrie in der Bearbeitungsstelle wirkt sich auf den Prozess und die Einstellung der laserspezifischen Prozessparameter aus. So wird in [75] beschrieben, wie die Prozessparameter für das Entgraten einer Schneidkante bestimmt werden können. Ausgehend von dem Schliffwinkel ϑ der Schneidkante und der zu erzeugenden Verrundung mit dem Radius r_k können mit Hilfe des Strahldurchmessers $d_f = 2 \cdot \omega_0$ und der Werkstoffkenngrößen wie dem Koeffizienten der Wärmeleitfähigkeit λ , der Temperaturleitfähigkeit κ sowie der Schmelz- und Verdampfungstemperatur des Schneidenwerkstoffs T_s und T_v folgende Prozessparameter berechnet werden:

$$\text{Laserleistung: } P_{\text{av}} = \frac{2 \pi \omega_0^2 \lambda (T_v - T_s)}{r_k \left(1 - \sin \frac{\vartheta}{2}\right)} \quad (3.11)$$

$$\text{Vorschubgeschwindigkeit: } v = \frac{8 \omega_0 \kappa}{\pi r_k^2 \left(1 - \sin \frac{\vartheta}{2}\right)^2} \left(\frac{T_v - T_s}{T_v + 273}\right)^2 \quad (3.12)$$

$$\text{Pulsdauer: } \tau = \frac{r_k^2}{4 \kappa} \left(1 - \sin \frac{\vartheta}{2}\right)^2 \left(\frac{T_v - T_s}{T_v + 273}\right)^2 \quad (3.13)$$

Eine große Verrundung erfordert eine große Wärmeausbreitung im Kantenbereich. Um diese zu erreichen, ist die Intensität zu senken und die Bestrahlungsdauer zu verlängern. Dieser Sachverhalt ergibt sich aus den Gleichungen 3.11 und 3.12, mittels derer die erforderliche mittlere Intensität und Streckenenergie berechnet werden kann, um eine Kante mit dem Kantenradius r_k zu verrunden. Wie aus dem hier erstellten Diagramm 3.13a ersichtlich ist, sinkt die einzusetzende Intensität mit zunehmender Verrundung. Gleichzeitig wird die Vorschubgeschwindigkeit v verringert, so dass die Streckenenergie E_s ansteigt (Abb. 3.13b).

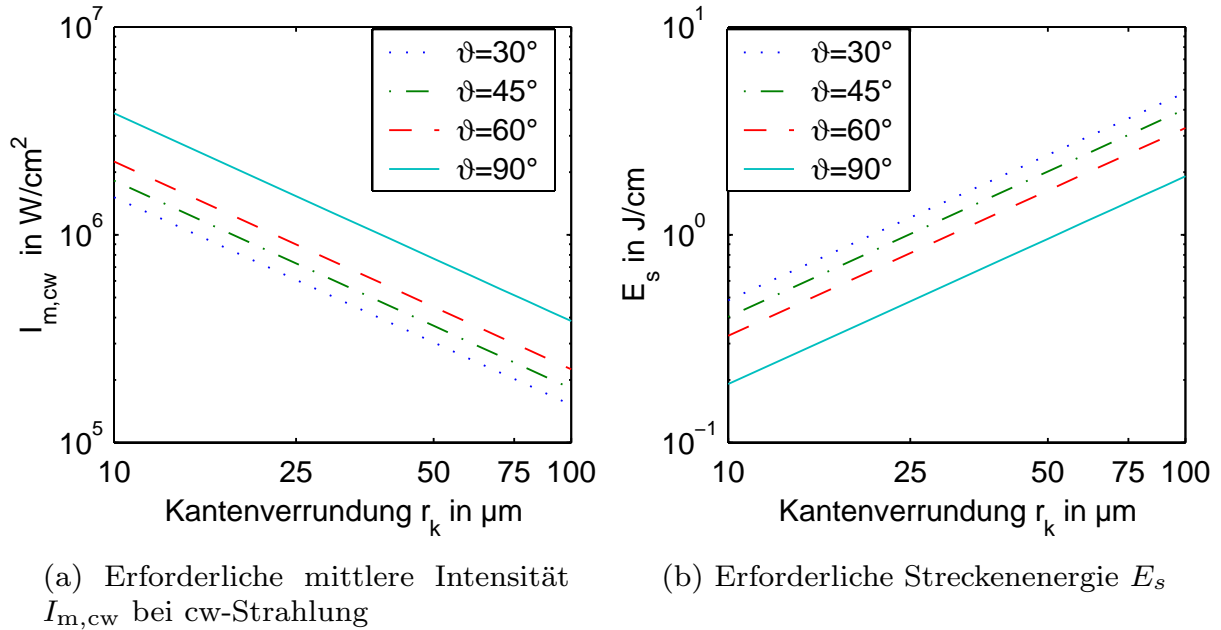


Abb. 3.13: Erforderliche Intensität und Streckenenergie zum Erzeugen der Kantenverrundung mit dem Radius r_k , berechnet nach Gl. 3.11 und 3.12. Variierter Parameter: Kantenwinkel ϑ . Fokussdurchmesser $d_f = 200 \mu\text{m}$, Materialkennwerte für St 37.

3.4.3 Bekannte Laserentgratanwendungen

Die Anwendungen zum Laserentgraten können nach vier Prozessmechanismen klassifiziert werden. Abbildung 3.14 zeigt dazu in einer Übersicht die Arbeiten, die die Grundlage für den derzeitigen Stand der Technik des Laserentgratens bilden und auf die im folgenden Abschnitt detaillierter eingegangen wird. Zusammenfassend lässt sich die Mehrzahl der Entgratanwendungen in zwei Klassen aufteilen.

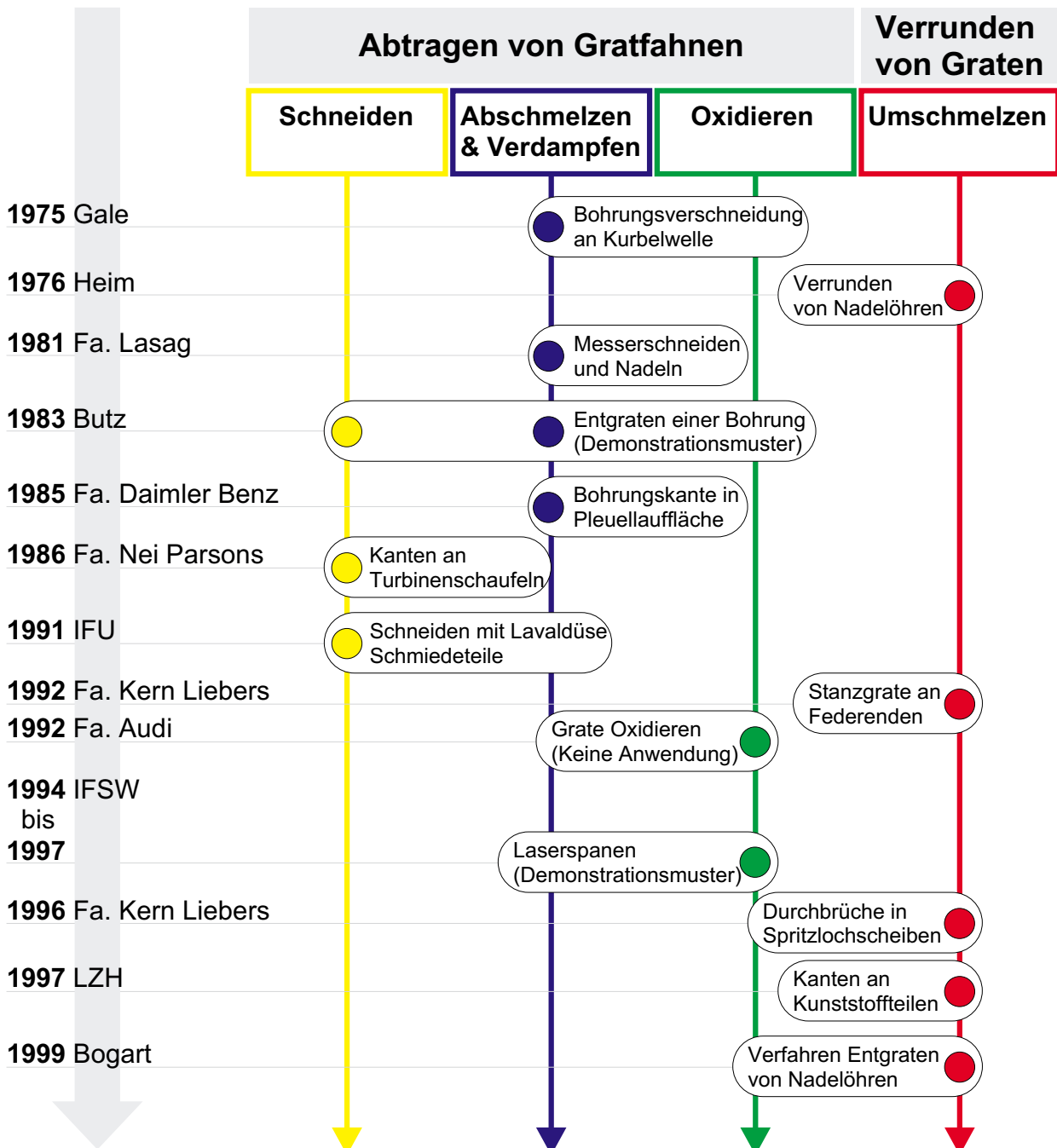


Abb. 3.14: Zeitliche Übersicht publizierter Arbeiten zum Laserentgraten mit Klassifizierung nach dem Prozessmechanismus

Entfernen von makroskopischen Graten, beispielsweise an Schmiedeteilen. Dazu werden Laser mit einer mittleren Leistung größer als 500 W eingesetzt; der Laserentwicklung folgend zunächst CO₂-Laser später auch Nd:YAG-Laser. Die eingesetzten Verfahrensmechanismen zum Abtragen der Grate sind Laserschneiden sowie die Kombination aus Abschmelzen und Verdampfen. Dazu muss in der Regel der Kantenverlauf mit dem Strahl abgefahren werden.

Verrunden von Kanten an Nadeln, Federn und Spritzlochscheiben. Hauptsächlich werden die Grate bei geringerer Laserleistungsdichte umgeschmolzen. Aufgrund der geringen erforderlichen Leistungsdichte wird teilweise mit defokussierter Laserstrahlung gearbeitet. Nadeln können direkt in den Strahl positioniert werden, größere Kantengeometrien werden zeilenweise überstrichen (abgescannt).

3.4.3.1 Verdampfen von Graten

Als erstes patentiertes Anwendungsbeispiel zum Laserentgraten gilt ein Verfahren zum Verdampfen von Graten an innenliegenden Bohrungsverschnitten [72]. Die Grate entstehen beim Einbringen einer Querbohrung in eine Kurbelwelle an der Verschneidung zu einer Durchgangsbohrung. Um sie zu entfernen, wird ein Laserstrahl koaxial zu der Durchgangsbohrung ausgerichtet und so fokussiert, dass der Fokusedurchmesser kleiner als der geringste Bohrungsdurchmesser ist und die Fokusebene zwischen dem Grat und der Fokussierlinse liegt. Zusätzlich ist bei diesem Verfahren die Brennweite der Fokussieroptik im Verhältnis zur Länge der Durchgangsbohrung kurz, so dass die Bohrungswand nicht beschädigt wird. Mit einem CO₂-Laser der Wellenlänge $\lambda=10,6\,\mu\text{m}$ und einer Leistung zwischen 1000 bis 3000 W wird der Grat bestrahlt. Aufgrund ihrer Geometrie erhitzen sich die Grate bis sie verdampfen, während sich die anliegende Bohrungswand wegen der im Verhältnis zum Grat guten Wärmeableitung nur geringfügig aufheizt. Als Ergebnis der Laserentgratung wird nicht nur die Grاتفreiheit, sondern auch eine leichte Verrundung der Kanten der Bohrungsverschneidung hervorgehoben.

Zur Entgratung einer Schneidkante wurde 1981 in einer Patentanmeldung [75] der Einsatz eines Laserstrahls so beschrieben, dass ein Strahl mit einer Intensität zwischen 10^6 und 10^8 W/cm^2 auf die Kante der Schneide fokussiert und an ihr entlang geführt wird. Neben Schneiden lassen sich auch Nadelspitzen durch Impulse der Leistung P_{av} und der Dauer τ entgraten. Die Pulsenergie liegt dann im Bereich von 0,03 bis 0,1 mJ und die Pulsdauer zwischen 0,3 bis $10\,\mu\text{s}$. Um idealerweise mit einem gaussförmigen Intensitätsprofil zu arbeiten, empfiehlt sich ein Laserstrahl mit TEM₀₀-Mode, wobei prinzipiell der Einsatz von kontinuierlich und gepulst betriebenen Lasern möglich ist.

Eine weitere Patentanmeldung [76], die auf [74] aufbaut, beschreibt das Entgraten einer Bohrung in der Lauffläche eines Pleuels. Dazu wird der Strahl mit Hilfe beweglicher Umlenkspiegel in der Strahlführung auf einer elliptischen Bahn entlang der Bohrungskante geführt, so dass der Grat erfindungsgemäß verdampft oder abschmilzt.

3.4.3.2 Abtrennen von Graten durch Laserschneiden

Als erste bekannte Anwendung zum Abtrennen von Graten durch Laserschneiden gilt das Entgraten von präzisionsgeschmiedeten Turbinenschaufeln aus nichtrostendem Stahl [77]. Mit einem CO₂-Laserstrahl von 1,2 kW Leistung wird die Geometrie der Turbinenschaufeln, die eine Länge von 30 bis zu 900 mm aufweisen, über einen CNC-gesteuerten Bearbeitungskopf abgefahren und die Kanten entgratet. Die Vorschubgeschwindigkeit liegt dabei in der Größenordnung von 2,5 m/min. Über den Entgratprozess an sich werden in [77] keine Aussagen getroffen.

In [84] wird beschrieben, wie mit einem Laserschneidverfahren Schmiedegräte von den Kanten einer Kurbelwelle entfernt werden. Dazu wird mit CO₂-Laserstrahlung einer Leistung von $P_{av}=750\text{ W}$ die Kanten geometrie abgefahren. Da das Entgraten der Kurbelwelle mit einem konventionellen Schneidkopf, der eine Unterschallschneiddüse beinhaltet, nicht möglich ist, muss eine spezielle Überschallschneiddüse eingesetzt werden. Mit dem in [84] entwickelten Laserentgratverfahren kann aber nur wirtschaftlich entgratet werden, wenn eine bereits vorhandene Laseranlage durch das Entgraten weiter ausgelastet werden kann.

3.4.3.3 Oxidation von Graten

In einer Erfindung von 1992 [78] wird ein Verfahrensprinzip beschrieben, Kanten zu entgraten, indem die Grate oxidiert werden. Dazu wird als Prozessgas Sauerstoff eingesetzt und der gesamte Kantenbereich mit defokussierter Laserstrahlung beaufschlagt. Die wirkende Laserenergie wird so gering gewählt, dass in einer Sauerstoffatmosphäre außer am Grat keine Oxidation auftritt. Weil sich die Grate aufgrund ihrer geringen Massenkonzentration und schlechten Wärmeableitung stark aufheizen, oxidieren sie. Der umliegende Kantenbereich heizt sich aufgrund der starken Wärmeableitung weniger stark auf, so dass die in diese Bereiche eingekoppelte Energie keine Werkstoffumwandlung bewirkt.

Eine Modifikation des Entgratens durch Oxidation ist das Anwenden des Laserspanens auf gratige Kanten. Das Verfahrensprinzip ähnelt dem thermischen Entgraten. Mit einem Laserstrahl wird die gratbehaftete Kante bestrahlt und aufgeschmolzen. Bei gleichzeitiger Sauerstoffzufuhr oxidiert die

Schmelze, so dass ein leicht entfernbares Reaktionsprodukt entsteht [81]. Bei geeigneter Wahl der Prozessparameter wie Laserleistung, Vorschub und Sauerstoffmenge heben sich diese Reaktionsprodukte als Oxidspan selbstständig von der Kante ab. Als Laser werden Nd:YAG-Laser unterschiedlicher Leistungsklassen zwischen 60 und 600 W eingesetzt [80, 82]. Aufgrund der Unregelmäßigkeit des Grates wird die Kantenbearbeitung in zwei Arbeitsschritten durchgeführt [80, 82, 83]. In einem ersten Arbeitsschritt, als Entgraten bezeichnet, wird mit geringer Leistungsdichte und hoher Sauerstoffzufuhr die Gratfahne in einem instabilen Laserspanprozess abgetrennt. Um die Gratfahne sicher mit dem Strahl zu erfassen, wird mit einem Fokusbereich von 2 mm gearbeitet, was letztendlich eine höhere Laserleistung erfordert. Im zweiten Arbeitsschritt, dem Kantenbrechen, wird die Kante zur gewünschten Form abgetragen und geglättet.

Eine industrielle Anwendung des Laserspanentgratens wurde bislang nicht aufgezeigt. In Versuchen an Demonstrationskanten mit künstlich erzeugtem Grat konnten nach [83] beim Kantenbrechen Verrundungsradien bis maximal 2 mm bei Abtragraten bis zu $76 \text{ mm}^3/\text{min}$ erzielt werden.

3.4.3.4 Entgraten durch Umschmelzen

Zum Verrunden eines Nadelöhrs wird in [73] ein Entgratverfahren durch Umschmelzen beschrieben. Dabei wird mit einem Laserstrahl das Nadelöhr so bestrahlt, dass die Oberfläche an den Rändern aufschmilzt und sich beim Wiedererstarren eine glatte Oberfläche bildet. Zum Aufschmelzen des Materials ist eine Leistungsdichte bei Bestrahlungsdauern in der Größenordnung einer Millisekunde von mindestens $1 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$ erforderlich. Um umliegende Bereiche nicht zu beeinflussen, darf der Strahl nur auf die zu glättende Stelle gerichtet werden. Bevorzugt werden gepulste Festkörperlaser im Wellenlängenbereich von 700 bis 40000 nm eingesetzt. Der Fokusbereich liegt im Bereich von 1 mm. Aufgrund der hohen Leistungsdichte des Laserstrahls kann defokussiert gearbeitet werden, um eine größere Fläche bestrahlen zu können. Die Pulsdauer in der Größenordnung von Millisekunden ist ein wichtiger Parameter und hängt von der Pulsform und der notwendigen Pulsenergie ab. Die eingesetzte Energiedichte liegt allgemein im Bereich von 1 bis 25 J/mm^2 und wird für den speziellen Anwendungsfall zwischen 5 und 10 J/mm^2 eingegrenzt. Um bei länglichen Nadelöhren gute Entgratergebnisse zu erzielen, wird erfindungsgemäß vorgeschlagen, simultan mit mehreren Laserstrahlen zu arbeiten. Das Entgratergebnis sind verrundete Kanten mit glatten Oberflächen, bei kohlenstoffhaltigen Stählen stellt sich nach der Bearbeitung eine dendritische Kornstruktur im Gefüge ein.

Um Stanzgrate an den Kanten von Federn zu verrunden, schlägt Frietsch in einer Patentanmeldung [85] ein Umschmelzen der Grate durch Laserstrah-

lung vor. Mit einem defokussiertem Laserstrahl wird das gratige Federende erwärmt, so dass die Oberfläche erweicht bzw. aufschmilzt. Daraufhin wird der Erwärmungsvorgang abgebrochen und es verbleibt ein verrundeter Gratwulst am Federende. Durch die Intensität und Dauer der Laserbestrahlung kann der Grad der Kantenverrundung beliebig gesteuert werden. Dabei ist eine geringe Intensität vorteilhaft, weil so lediglich die Kanten der Feder aufgeschmolzen werden. Neben der Kantenverrundung ergibt sich in der Wechselwirkungszone der Laserstrahlung eine partielle Oberflächenhärtung der Feder. Das Verfahren kann nach [85] mit einem Puls- oder Dauerstrichlaser durchgeführt werden. Der Prozessgaseinsatz wird nicht explizit gefordert.

Das Umschmelzen eignet sich auch für das Verrunden von kleinen Stanzgraten an Durchbrüchen in dünnwandigen Spritzlochscheiben [86, 87]. Das Verdampfen des Grates ist in diesem Fall nicht möglich, weil bei einer hohen Strahlleistung zu viel Energie in das Bauteil eingebracht wird, was bei einer Spritzlochscheibe aufgrund des geringen Materialvolumens zu Verzug führt. Dieses Problem kann nach [86] so gelöst werden, dass mit einem gepulsten Laserstrahl geringer Leistung der gratbehaftete Bereich zeilenweise mit hoher Geschwindigkeit überstrichen wird. Dadurch werden nur der unmittelbare Bereich der Gratoberfläche aufgeschmolzen und Gratpartikel in begrenztem Umfang verdampft. Dieser Vorgang kann so oft wiederholt werden, bis die gewünschte Verrundung erreicht ist. In Bezug auf die Grathöhe von typischerweise 0,02 mm, werden die Prozessparameter wie folgt eingrenzt, so dass ein handelsüblicher Beschriftungslaser eingesetzt werden kann:

- Laserleistung P_{av} bis 150 W,
- Pulsfrequenz f_p maximal 100 kHz,
- Scanvorschubgeschwindigkeit v maximal 3 m/s und
- Fokusbereich d_f mindestens 0,02 mm.

Abbildung 3.15 zeigt Mikroskopaufnahmen eines entgrateten Durchbruchs einer Spritzlochscheibe. In der linken Aufnahme (Abb. 3.15a) sind deutlich die einzelnen Pulseinbrände in der Oberfläche zu erkennen. Die Detailaufnahme (Abb. 3.15b) zeigt einen an der Bohrungswand anhaftenden wiedererstarrten Schmelztropfen.

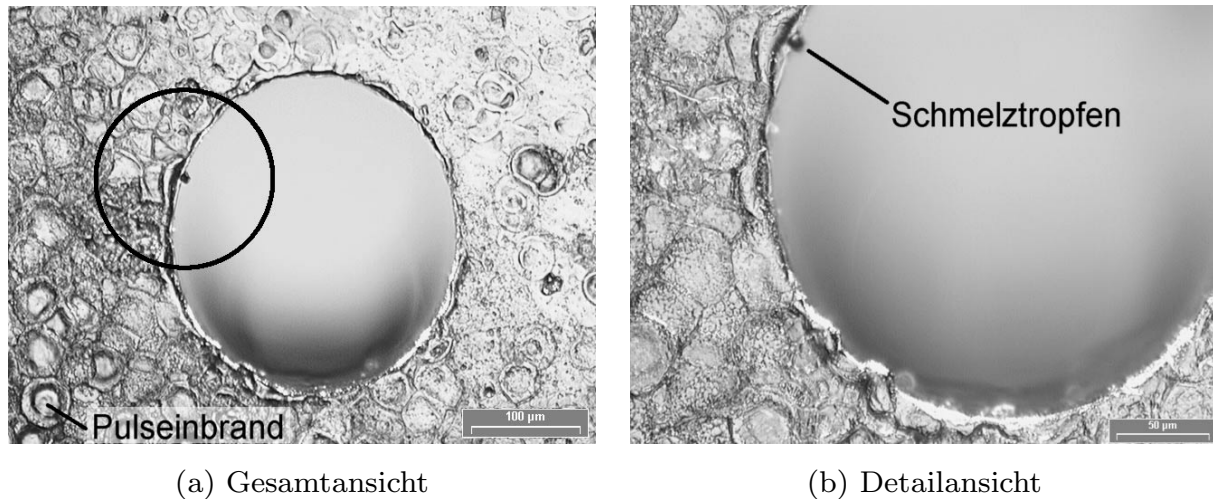


Abb. 3.15: Mikroskopaufnahmen einer entgrateten Bohrung einer Spritzlochscheibe (gefertigt von Fa. Kern & Liebers nach dem Verfahren von [86])

3.4.3.5 Laserentgraten von Kunststoff

Ebenfalls durch Umschmelzen der Grate können Kanten an thermoplastischen Formteilen verrundet werden [88, 89]. Durch unfokussierte CO_2 -Laserstrahlung wird Energie in die oberflächennahen Schichten des Kunststoffs gebracht. Trotz der Wärmeableitung in tiefer gelegene Schichten erhitzt sich die Oberfläche des Bauteils. Im Hinblick auf das Aufschmelzen der Grate reichen mittlere Laserleistungen von $P_{\text{av}} = 100 \text{ W}$ aus. Der zu verrundene Kantenbereich wird bis in die schmelzflüssige Phase erwärmt. Dabei muss das Werkstück so ausgerichtet werden, dass durch die Gravitationskraft die Schmelzphase in die gewünschte Kantenform verläuft. Bei Wiedererstarrung entsteht eine optisch hochwertige Oberfläche, innerhalb der Bearbeitungszone tritt keine Karbonisierung auf. Aufgrund des unfokussierten nahezu parallelen Strahls ist im Gegensatz zu bekannten Schneidanwendungen keine Fokuslageregelung erforderlich.

3.4.4 Maßnahmen zur Prozesssicherung

Bereits von Butz [74] wurde erkannt, dass der Laserentgratprozess durch die Positionierung des Laserstrahls zur Kante maßgeblich beeinflusst wird. Eine Möglichkeit die dadurch bedingten Prozesstoleranzen zu minimieren besteht darin, einen hinsichtlich des Positioniereinflusses robusten Prozess auszuwählen. Um die gegenüber dem Bauteil reduzierte Wärmeableitung in den Graten zu nutzen, wird beispielsweise in [78] gezielt defokussierte Laserstrahlung eingesetzt, um die Grate zu oxidieren. Beim indirekt wirkenden Laserentgraten durch Abscannen ist es nicht notwendig den Laserstrahl zur

Kante, sondern in einer größeren Toleranz zum Bauteil auszurichten.

Ist es prozessbedingt jedoch erforderlich, den Laserstrahl relativ zur Kante präzise zu positionieren, werden verschiedene Maßnahmen zur Prozesssicherung eingesetzt:

- In [75] wird die an der Schneidkante vorbeigestrahlte Laserleistung mit einem Detektor gemessen. Anhand dieses Signals werden Korrekturwerte für die Positionierung des Laserstrahls berechnet, so dass der Bearbeitungskopf entsprechend positioniert werden kann.
- Beim Entgraten von Nadelöhren wird in [79] der Einsatz eines Bildverarbeitungssystems als Positionierhilfe vorgesehen.
- Durch den Einsatz eines on-line arbeitenden Bildverarbeitungssystems ist es nach [78] möglich, einen Roboterarm automatisch entlang der Kante zu führen.

Eine weitere Maßnahme zur Prozesssicherung besteht darin, die Temperatur des Bauteils im zu entgratenden Kantenbereich zu überwachen. Anhand eines Temperaturmesswertes kann dann die Laserleistung on-line geregelt werden [78].

Kapitel 4

Motivation und Aufgabenstellung

4.1 Einsatzgrenzen für Entgratverfahren

Durch aktuelle Tendenzen in der Fertigung wie beispielsweise wachsendem Kostendruck werden die Anforderungen an Entgratverfahren zunehmend gesteigert:

- Durch erhöhte Qualitätsanforderungen ist auch der Verbleib von Graten kleiner Dimensionen am Werkstück nicht mehr zulässig.
- Durch Entgratverfahren sind nicht nur Grate zu entfernen, sondern auch definierte Verrundungen an den Bauteilkanten zu erzeugen.
- Aufgrund der Miniaturisierung der Bauteile werden die zu entgratenden Geometrien kleiner. Ein weiterer Effekt der Miniaturisierung ist, dass die Funktionsbereiche der Bauteile räumlich dichter beieinander liegen. So kann beispielsweise eine präzise zu verrundene Kante direkt an einer Dichtfläche hoher Oberflächenqualität liegen.

Somit müssen die bestehenden Entgratverfahren präziser werden, um den gesteigerten Qualitätsanforderungen gerecht zu werden. Trotz der fortlaufenden Verbesserung der konventionellen Entgratverfahren sind den einzelnen Verfahren, bedingt durch das jeweilige physikalische Wirkprinzip, Grenzen gesetzt, die sich auf die erreichbare Qualität, die Prozessgeschwindigkeit und -sicherheit beziehen. Durch die Entwicklung neuer Entgratverfahren sind die Entgrataufgaben zu lösen, bei denen mit den konventionellen Entgratverfahren keine ausreichenden Ergebnisse erzielt werden und deswegen mit einem hohen Kostenaufwand manuell entgratet wird.

4.2 Aufgabenstellung und Gliederung der Arbeit

Obwohl einige Anwendungen zum Laserentgraten bekannt sind und der Laserstrahl als prinzipielle Möglichkeit zum Entgraten gesehen wird [4, 90], hat sich das Laserentgraten in der industriellen Fertigung in großer Breite bislang nicht durchgesetzt. Die Gründe dafür liegen in bisher mangelnder Wirtschaftlichkeit und Entgratqualität.

Doch die sich weiterentwickelnde Lasertechnik bietet ein großes Potenzial, wirtschaftlich mit Laserstrahlung entgraten zu können. Somit ist es das übergeordnete Ziel dieser Arbeit, Laserentgraten so weiterzuentwickeln, dass es wirtschaftlich eingesetzt werden kann. Im Vordergrund stehen die Entgrataufgaben, bei denen die konventionellen Verfahren keine befriedigenden Ergebnisse liefern. Dabei soll sich die vorliegende Arbeit auf das Laserentgraten von Stahlwerkstoffen beschränken und wie folgt vorgegangen werden:

- Um Laserentgraten wirtschaftlich einsetzen zu können, wird im Abschnitt 5.1 das mögliche Anwendungsspektrum aufgezeigt, das in die Erstellung eines Pflichtenheftes mündet.
- Anhand der bekannten Anwendungen zum Laserentgraten können in Abschnitt 5.4 die grundlegenden Realisierungsmöglichkeiten abgeleitet werden.
- In Kapitel 6 werden die maßgeblichen Prozessparameter zum Laserentgraten identifiziert und deren Einflüsse auf das Entgratergebnis untersucht.
- Obwohl in einigen Publikationen auf die Prozessmechanismen zum Laserentgraten eingegangen wurde, fehlt ein umfassendes Prozessmodell. Deswegen ist es ein wichtiges Teilziel dieser Arbeit, ein phänomenologisches Prozessmodell für das Laserentgraten zu entwickeln, welches in Kapitel 7 dargestellt wird.
- Um die fertigungstechnischen Aspekte des Laserentgratens hervorzuheben, werden die in dieser Arbeit erarbeiteten Grundlagen und Randbedingungen anhand von fertigungsnahen Beispielen in Kapitel 8 verdeutlicht.
- Anhand der erzielten Ergebnisse wird in Kapitel 9 das Laserentgraten gegenüber konkurrierenden konventionellen Entgratverfahren abgegrenzt. Denn nur bei Kenntnis seiner Möglichkeiten und Grenzen kann das Laserentgraten wirtschaftlich eingesetzt werden und sich in der Fertigung etablieren.

Kapitel 5

Anforderungen an das Laserentgraten

Die bereits entwickelten Laserentgratanwendungen, die in Kapitel 3.4 beschrieben werden, unterscheiden sich im Hinblick auf die zu entfernende Gratgröße deutlich voneinander. Da die Betrachtung des gesamten Spektrums an Laserentgrataufgaben zu umfangreich ist, muss sich diese Arbeit auf ein reduziertes Spektrum beschränken. Aufbauend auf dem Stand der Technik und einer Analyse bislang kritischer Entgrataufgaben in der Fertigung wird daher für diese Arbeit ein eingeschränktes Spektrum an Entgrataufgaben für Laserentgraten spezifiziert.

5.1 Werkstück- und Anwendungsspektrum

Das Laserentgraten kann nur in den Fällen wirtschaftlich eingesetzt werden, bei denen sich Taktzeit und Kosten gegenüber etablierten Entgratverfahren verringern lassen. Der mögliche Anwendungsbereich des Laserentgratens ist deshalb auf Entgrataufgaben einzugrenzen, bei denen entweder Zeit- und Kostenvorteile oder eine bessere Qualität erzielbar sind. Das Anwendungspotential für das Laserentgraten in der Fertigung erstreckt sich damit auf folgende Entgrataufgaben:

- Kritische Entgratprozesse deren zugehöriges, konventionelles Entgratverfahren hinsichtlich der Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Entgratung Mängel aufweist.
- Entgrataufgaben, die bisher manuell ausgeführt werden müssen, weil

sie sich durch kein maschinelles Entgratverfahren lösen lassen, und dadurch hohe Kosten verursachen.

5.1.1 Klassifizierungsschema für Laserentgratanwendungen

In der Praxis sind bei der Vielzahl der Entgrataufgaben nicht alle Anforderungen im Detail bekannt, so dass ein Vergleich der Entgrataufgaben anhand der von Beier formulierten Aspekte (Seite 3) nicht möglich ist. Um Entgrataufgaben zu klassifizieren und hinsichtlich des möglichen Einsatzes des Laserentgratens zu bewerten, werden in dieser Arbeit einfache Klassifizierungsmerkmale verwendet, die in Abbildung 5.1 dargestellt sind.

Die *Kantenlage* bestimmt maßgeblich, wie die Kante mit einem Laserstrahl bestrahlt werden kann. Während außenliegende Kanten unter beliebigen Winkel bestrahlt werden können, ergeben sich für innenliegende Kanten Einschränkungen hinsichtlich des Einstrahlwinkels und der Fokussierung. Hinsichtlich der beschränkten Einstrahlmöglichkeiten sind innenliegende Kanten schwieriger mit dem Laser zu entgraten.

Die *Kantengeometrie* wirkt sich auf die Komplexität der Strahlführung aus. Der steuerungstechnische Aufwand zum Abfahren einer Geraden ist geringer als der zum Abfahren einer Raumkurve. Deswegen steigt hinsichtlich der Positionierung des Laserstrahls zur Kante die Schwierigkeit mit komplizierteren Kantengeometrien.

Die *Gratart* wird durch das Fertigungsverfahren bestimmt. Hier zeigt sich,


	Schwierigkeitsgrad 				
Kantenlage	außen	innen			
Kanten- geometrie	linear (1D)	Bohrung	Kontur (2D)	Kegelschnitt (3D)	Trajektorie (3D)
Gratart	Flittergrat (Feinstbearbeit.)	Feingrat (Schlichten)	Massivgrat (Schruppen)		
Verrundung (Kantenmaß)	unbestimmt (Gratfreiheit)	definiertes Kantenmaß			
		> 100 µm	> 50 µm	50 - 20 µm	< 20 µm
Werkstoff (Stahl)	ferritisch		austenisch	Sonder- legierung	
	100 Cr 6	16 MnCr 5	X5 CrNi 18 8		

Abb. 5.1: Klassifizierungsmatrix für Laserentgratanwendungen

dass Fräsgrate massiver als Schleifgrate sind. Die Gratart liefert somit eine qualitative Aussage über die Gratabmessungen.

Die *Kantenverrundung* als gefordertes Entgratergebnis wirkt sich stark auf den Entgratprozess aus. Grundlegend zu unterscheiden ist, ob lediglich Gratfreiheit oder aber ein definiertes Kantenmaß erreicht werden soll. Der Schwierigkeitsgrad steigt mit abnehmenden Kantenmaßen, da dann die absoluten Toleranzmaße kleiner werden.

Die Absorptions- und Wärmeleitungseigenschaften sowie die chemische Zusammensetzung eines *Werkstoffs* haben großen Einfluss auf den Lasermaterialbearbeitungsprozess. Ein Schwierigkeitsgrad kann dem Werkstoff anhand des Laserabtragverfahrens (siehe Kapitel 3.3), mit welchem er prinzipiell abgetragen werden kann, und der erforderlichen werkstoffspezifischen Abtragschwellintensität zugeordnet werden.

5.1.2 Anwendungsschwerpunkte für Laserentgraten

Um den potenziellen Anwendungsbereich für Laserentgraten definieren zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit innerhalb der Robert Bosch GmbH derzeit kritische Entgrataufgaben aus der Fertigung ermittelt, wie sie auf Seite 45 spezifiziert sind. Dabei konnten insgesamt 20 kritische Entgrataufgaben aufgezeigt werden, deren fertigungstechnische Randbedingungen prinzipiell Laserentgraten zulassen.

Abbildung 5.2 zeigt, wie die 20 aufgezeigten Entgrataufgaben anhand des erarbeiteten Klassifizierungsschemas nach Abbildung 5.1 charakterisiert werden können. Für jedes der fünf Klassifizierungsmerkmale wird in Abbildung 5.2 die relative Verteilung der Anforderungen dargestellt.

In Bezug auf die Kantenlage zeigt sich, dass bei ungefähr zwei Dritteln der potenziellen Entgrataufgaben Außenkanten zu entgraten sind. Die Außenkanten umfassen hinsichtlich der Kantengeometrie hauptsächlich gerade Kanten (linear) und Kanten zwischen Bohrungen und ebenen Oberflächen. Bei den Entgratanwendungen mit Innenkanten handelt es sich in erster Linie um innenliegende Bohrungsverschneidungen.

Hinsichtlich der Gratart sind hauptsächlich relativ feine Grate zu entfernen, der Anteil massiver Fräsgrate mit einer Gratdicke über $50\,\mu\text{m}$ ist gering. Die Anwendungen außer Acht lassend bei denen das Entgratergebnis nur hinsichtlich der Gratfreiheit definiert wird, gilt es durch das Laserentgraten scharfkantig-gratfreie Kanten zu erzeugen, deren Kantenmaß a kleiner $100\,\mu\text{m}$ ist. Dass bei 70 % der potenziellen Anwendungen Grate aus dem Werkstoff 100 Cr 6 zu entfernen sind, begründet sich dadurch, dass für Bauteile aus dem Bereich der Automobilkraftstoffeinspritzung 100 Cr 6 als härtpbarer Stahl einen Standardwerkstoff darstellt.

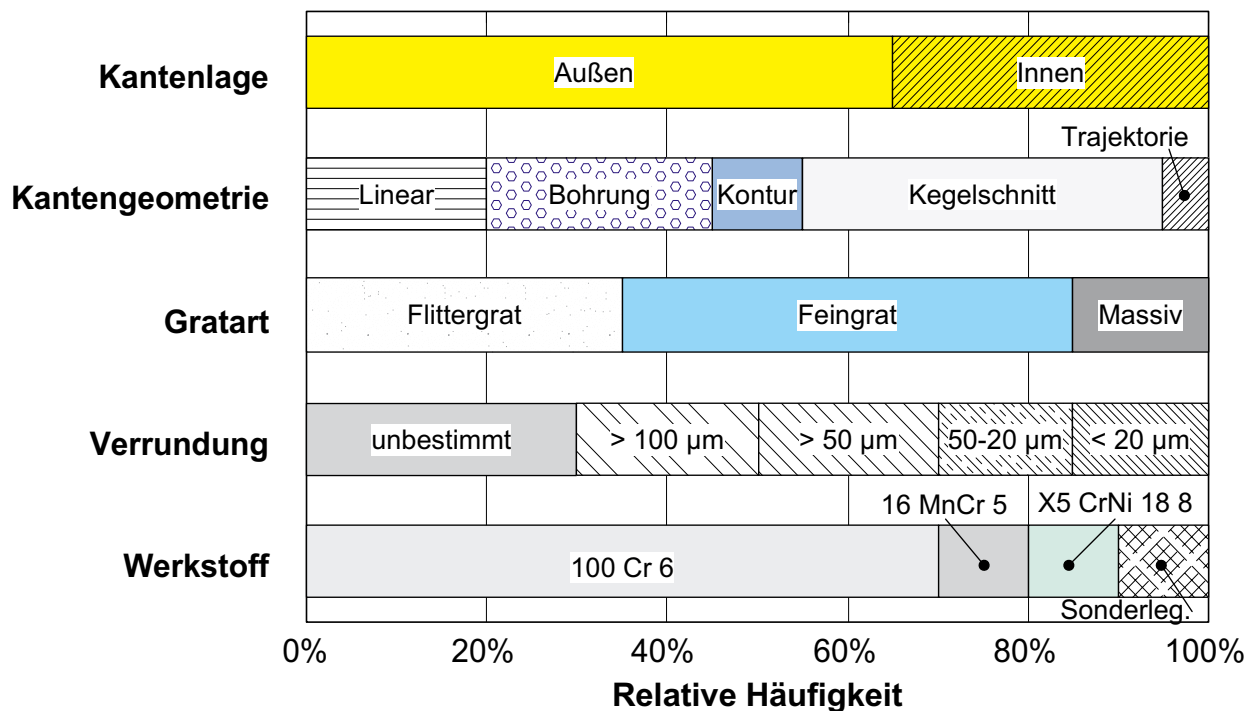


Abb. 5.2: Relative Verteilung der Anforderungen je Klassifikationsmerkmal für potenzielle Laserentgratanwendungen

5.2 Pflichtenheft zur Verfahrensentwicklung

Aus den aufgezeigten Schwerpunkten des Spektrums der potenziellen Aufgaben für Laserentgraten in Abbildung 5.2 lässt sich der Bereich der anwendungsbezogenen Verfahrensentwicklung für diese Arbeit eingrenzen. Weil außenliegende Kanten unter frei wählbaren Winkeln bestrahlt werden können und sich somit hinsichtlich der Prozessgestaltung keine geometrisch bedingten Restriktionen ergeben, liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf außenliegenden Kanten. Desweiteren sollen zunächst nur einfache Geometrien wie gerade Kanten betrachtet werden. Dann lässt sich für die Versuchsdurchführung die Anlagenkomplexität reduzieren. Komplexere Geometrien können später bei Kenntnis der Prozessparameter ausgewählt werden.

Die von den 20 potenziellen Laserentgrataufgaben unter den genannten Einschränkungen verbleibenden Entgrataufgaben können zu den folgenden vier exemplarischen Fällen zusammengefasst werden:

- Entfernen von Schleifgraten an einer Lochscheibe,
- Entfernen eines Schleifgrats an einer Ventilsitzbohrung,
- Verrunden von Stanzgraten an einer Spritzlochscheibe,
- Entfernen eines Fräsgrates an einer Keilnutkante.

Aus diesen vier Entgrataufgaben wird für diese Arbeit ein Pflichtenheft für Laserentgraten abgeleitet, das in Tabelle 5.1 dargestellt ist und aus dem die detaillierten Anforderungen an den Laserentgratprozess hervorgehen. Dabei gilt zusammenfassend, dass das Laserentgraten als lokal wirkendes Entgratverfahren für feinwerktechnische Anwendungen eingesetzt werden soll. Demnach sind Grate kleiner Abmessungen so zu entfernen, dass keine Gratrückstände verbleiben und umliegende Oberflächen nicht durch fest anhaftende Ablagerungsprodukte beschädigt werden.

5.3 Detaillierung der Anforderungen

Die anwendungsbezogene Verfahrensentwicklung zum Laserentgraten orientiert sich am geforderten Entgratergebnis. Dazu ist es notwendig, sowohl das Entgratergebnis als auch den Prozess anhand von Bewertungskriterien detaillierter beurteilen zu können.

5.3.1 Bewertungskriterien zur Verfahrensbeurteilung

Aufbauend auf den im vorangegangenen Abschnitt 5.1 dargestellten Kriterien zur Grobklassifizierung einer Laserentgrataufgabe werden zur Beurteilung eines Laserentgratprozesses detaillierte Bewertungskriterien definiert. Die in Tabelle 5.2 aufgeführten Bewertungskriterien dienen dazu, sowohl das Entgratergebnis bezogen auf eine Kante als auch den Prozess im Gesamten zu beurteilen.

5.3.2 Gewichtete Anforderungen an Laserentgraten

Zur anforderungsgerechten Entwicklung des Laserentgratens im Bereich der aufgezeigten feinwerktechnischen Anwendungen sind die im Abschnitt 5.3.1 definierten Bewertungskriterien zu gewichten. Für die exemplarischen Entgrataufgaben (siehe Seite 48) konnten die potenziellen Anwender aus der Fertigung den Bewertungskriterien jeweils eine Wichtigkeit zwischen 0 und 9 Punkten zuordnen. Weil die Gesamtpunktesumme je Anwendung unterschiedlich hoch ausfiel, mussten die Punktzahlen bezogen auf die Gesamtsumme normiert werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.3 grafisch dargestellt.

Die Gratfreiheit kommt als primäres Ziel des Entgratens deutlich zum Ausdruck. An der hohen Gewichtung, dass es keine Sekundärgrate und keine fest anhaftenden Schmelzspritzer geben darf, ist zu erkennen, dass Laserentgraten nicht als Vor- sondern Endbearbeitung einzuordnen ist. Die größten

	Merkmal	Spezifikation	G	Bemerkung
Bauteil				
Werkstoff	Stahlwerkstoffe	100 Cr 6 16 MnCrS 5 X5 CrNi 18 10	F	Unterscheidung in ferritische und austenitische Stähle
Außenabmaße	Länge	5 bis 150 mm	W	kleine bis sehr kleine Bauteile
	Durchmesser	$6 < D < 30$ mm	M	
Wärmebehandlung	Härte	$H < 760$ HV 10	M	Bauteile teilweise bainitisiert
Kanten				
Lage	außenliegend und frei zugänglich		F	mit verschiedenen Einstrahlwinkeln bearbeitbar
Geometrie	Bohrungen	$0,2 < D < 2,8$ mm	M	
	gerade Kanten	Länge < 12 mm	M	
Grat				
Entstehungsart	Fertigungsverf.	Schleifen	F	Mech. Bearbeitung beeinflusst Grataus- bildung
		Nutfräsen	W	
		Mikrostanzen	W	
Gratausbildung	Gratlänge	$0 < l_g < 12$ mm	M	Schwerpunkt bei: Gratdicken $< 20\text{ }\mu\text{m}$ Grathöhe $< 100\text{ }\mu\text{m}$
	Gratdicke	$0 < d < 200\text{ }\mu\text{m}$	M	
	Grathöhe	$0 < h < 500\text{ }\mu\text{m}$	M	
Entgratergebnis				
Wirkbereich	Kantenbereich	$B < 1$ mm	M	lokal an der Kante wirkendes Verfahren
Wärmeeinflusszone	Neuhärtebereich	$< 1\text{ }\mu\text{m}$	M	keine Beeinflussung der Bauteilhärte
Kantenverrundung	Kantenmaß	$10 < a < 500\text{ }\mu\text{m}$	M	
Fertigungsintegration				
Taktzeit	Prozesszeit	$1 < t_{Teil} < 20$ s	M	
Folgeprozeß		kein	W	Laserentgraten als Finishprozess

Gewichtung G: F = Festforderung, M = Mindestforderung, W = Wunsch

Tab. 5.1: Pflichtenheft zur Verfahrensentwicklung Laserentgraten

Kriterium	Ziel	Bemerkung
• <i>Prozessrückstände</i>		
Restgrate	keine	Gratfreiheit als globales Ziel.
Sekundärgrat	kein	Durch das Entgratverfahren verursacht.
Schmelzspritzer	keine	Aufgrund der Schmelzbaddynamik verursachte Spritzer, die an umliegenden Bauteilflächen anhaften.
Ablagerungen	keine	Niederschläge von oxidiertem Metaldampf im Kantenbereich, teilweise abwasch- bzw. entfernbar.
• <i>Kantenprofil</i>		
Kantenmaß a_x	Wert	Laterales Kantenmaß (siehe Abb. 6.6)
Kantenmaß a_z	Wert	Paralleles Kantenmaß (siehe Abb. 6.6)
Kantenform	Wert	Die Kantenform kann über den Verrundungsradius angegeben werden.
• <i>Wärmeeinfluss</i>		
Neuhärtezone	keine	Neuhärtezone können bei Belastung abplatzen.
Gefüge	konst.	Gefügeveränderungen im Grundwerkstoff beeinflussen die globalen Bauteileigenschaften wie Festigkeit und Maßhaltigkeit.
Legierung	konst.	Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs an der Oberfläche kann aufgrund von Diffusionsvorgängen beeinflusst werden.
• <i>Entgratprozess</i>		
Prozesszeit	kurz	Beeinflusst die erreichbare Taktzeit und Kosten.
Genauigkeit	hoch	Absolute Prozessgenauigkeit: mit welcher Genauigkeit die Kantengeometrie vorgegeben werden kann.
Toleranz	gering	Zur Beurteilung der Prozessfähigkeit wichtig (6s-Kriterium)
• <i>Sonstiges</i>		
Kosten	gering	Kosten für das Entgraten pro Teil.
Platzbedarf	klein	Platzbedarf durch Strahlführung und Laser ist bei der Verfahrensintegration zu beachten.

Tab. 5.2: Bewertungskriterien zur Beurteilung des Laserentgratens

Differenzen in der Bewertung zeigen sich beim Wärmeeinfluss (sich auswirkend auf die Neuhärtezone, Grundgefügeveränderungen und Änderung der Legierungsbestandteile) und bei den Kosten.

So kann beispielsweise bei der Spritzlochscheibe als Massenbauteil mit den derzeit eingesetzten Entgratverfahren eine ausreichende Qualität gewährleistet werden, so dass im Hinblick auf ein neues Verfahren der Kostenaspekt im Vordergrund steht. Hingegen kann bei den Beispielen der Lochscheibe und des Ventil Sitzes mit den konventionellen Verfahren keine zufriedenstellende Qualität des Entgratergebnisses erzielt werden. In diesem Fall wird den Kosten in der Gesamtbewertung eines Entgratverfahrens eine untergeordnete

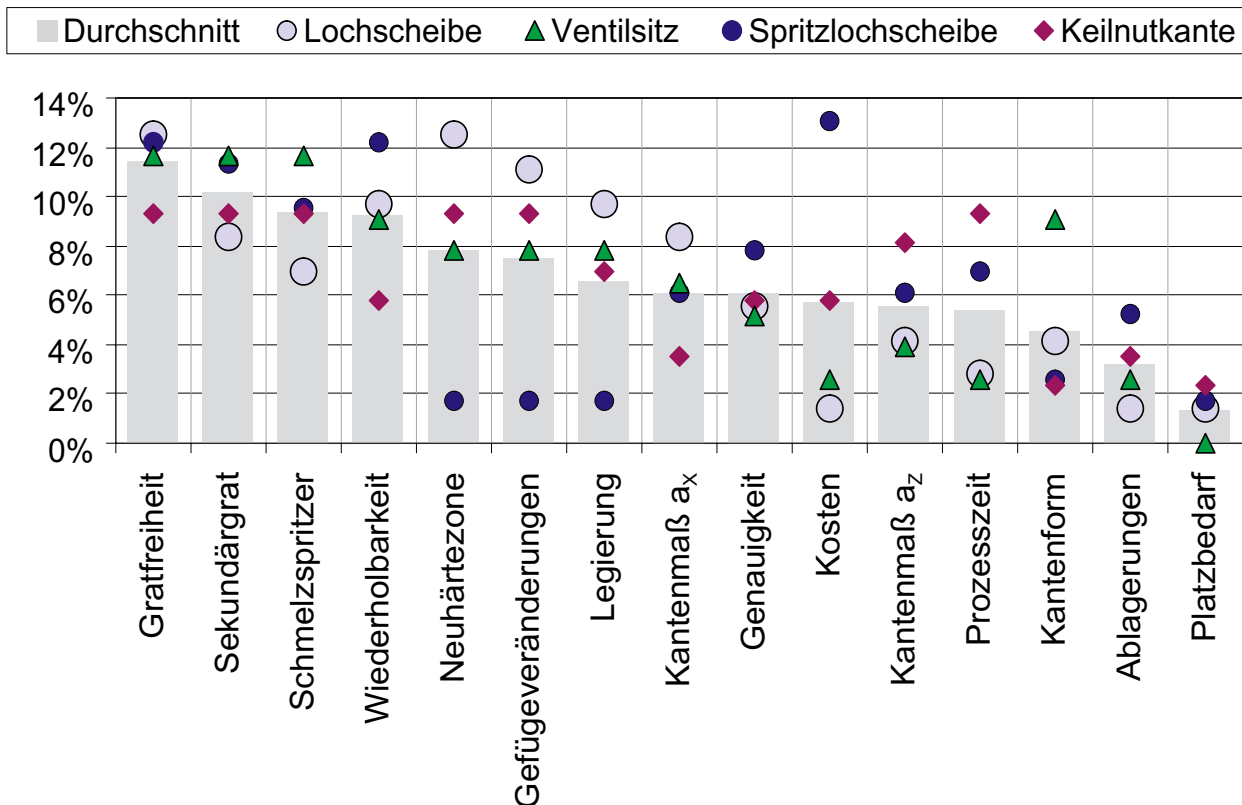


Abb. 5.3: Gewichtung der Bewertungskriterien für Laserentgratanwendungen nach Kundenwünschen zu exemplarischen Anwendungsbeispielen

Bedeutung beigemessen.

Bei der Entwicklung des Laserentgratens muss also zwischen dem Kostenaspekt und der erzielbaren Qualität hinsichtlich vollkommener Gratfreiheit oder definierter Kantenverrundung differenziert werden. Außerdem wird der Wärmeeinfluss je Anwendungsbeispiel sehr unterschiedlich bewertet, so dass dieser Aspekt durch spezielle Verfahrensentwicklungen für die jeweilige Applikation gesondert berücksichtigt werden muss.

5.4 Ansätze zur Realisierung

Aufbauend auf den bereits bekannten und in Abschnitt 3.4 beschriebenen Laserentgratanwendungen sollen in diesem Abschnitt Lösungsansätze zum Laserentgraten bei feinwerktechnischen Anwendungen aufgezeigt werden.

5.4.1 Geeignete Prozessmechanismen

Durch Laserstrahlung können Grate verrundet, abgetragen oder abgeschnitten werden. In Abschnitt 3.4 wurden dazu vier grundlegende Prozessmecha-

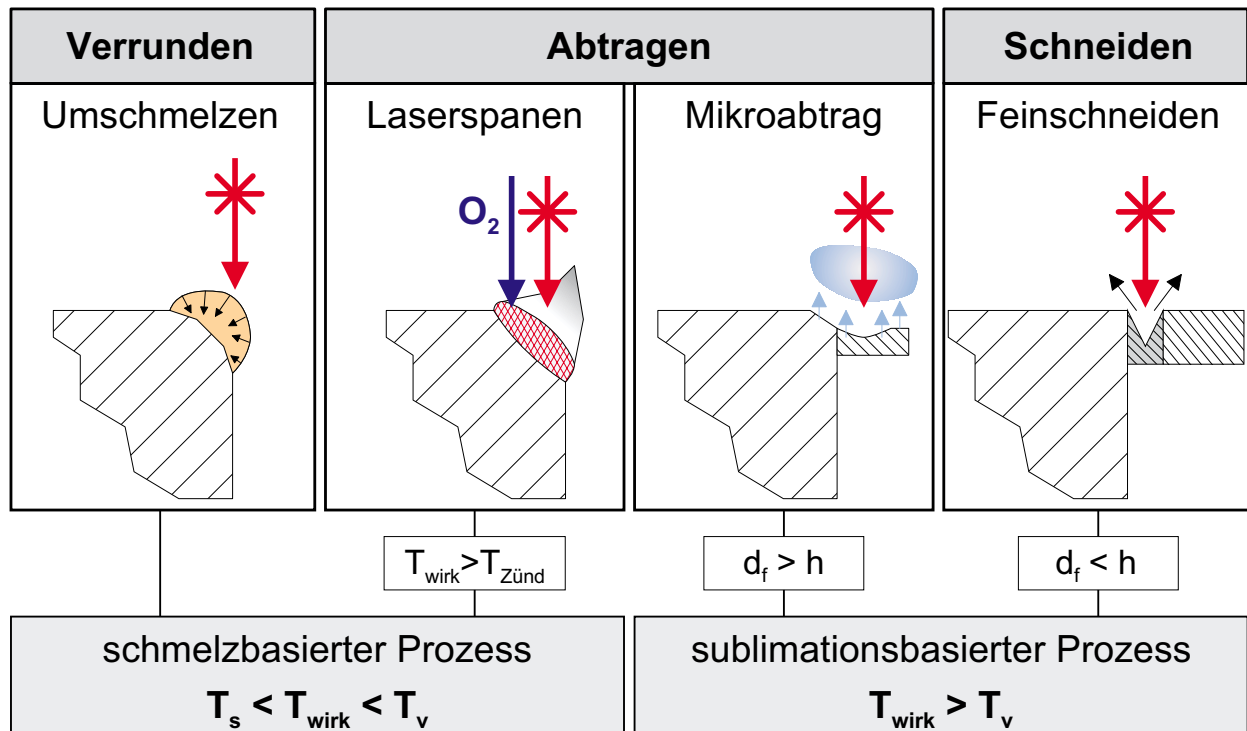


Abb. 5.4: Übersicht Prozessmechanismen zum Laserentgraten

nismen zum Laserentgraten aufgezeigt. Für das Entgraten bei feinwerktechnischen Anwendungen, sind jedoch nicht alle nach dem Stand der Technik bekannten Laserentgratverfahren geeignet. Weil in dieser Arbeit Laserentgraten als Endbearbeitungsprozess zu realisieren ist, sind die Prozessmechanismen, bei denen mit einem Prozessgasstrahl aufgeschmolzenes Material ausgeblasen wird, aufgrund der Schmelzspritzerbildung nicht geeignet. Dieses trifft auf das Laserschmelzabtragen (Makroabtrag) und das konventionelle Schmelz- und Laserbrennschneiden nach DIN 8590 zu.

Abbildung 5.4 zeigt die Prozessmechanismen für Laserentgraten feinwerktechnischer Anwendungen im Überblick. Zum Verrunden, ohne einen Kantenabtrag zu erzielen, können die Grate umgeschmolzen werden. Durch Laserspanen oder sublimationsbasierten Mikroabtrag lassen sich Grate und Kanten abtragen. Ferner lassen sich Gratfahnen durch Feinschneiden entfernen. Das Feinschneiden basiert auf einem sublimationsbasierten Mikroabtragprozess, wobei der Fokussdurchmesser d_f kleiner als die Grathöhe h ist.

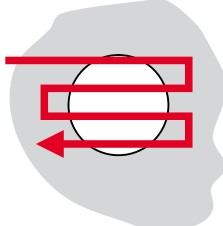
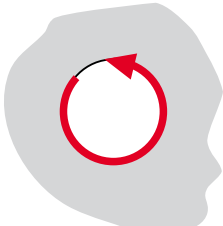
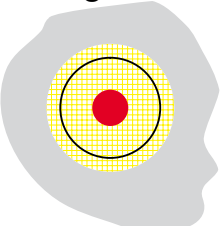





















Da das Entgraten durch Laserspanen in seinen Grundlagen bereits in vielen Arbeiten beschrieben wurde [80, 81, 82, 83], werden in dieser Arbeit (Kapitel 6 und 7) lediglich die Prozessmechanismen zum Umschmelzen der Grate sowie zum Abtragen und Abschneiden der Gratfahnen auf Basis des sublimationsbasierten Mikroabtrags untersucht.

5.4.2 Möglichkeiten der Verfahrensführung

Die drei prinzipiellen Möglichkeiten den Laserstrahl zur gratigen Kante zu positionieren sind durch den Stand der Technik bekannt (siehe Seite 33). Für diese Arbeit werden folgende Begriffe für die Verfahrensführung definiert:

- Konturentgraten: Abfahren der Kanten
- Scanentgraten: Abscannen des Kantenbereichs
- Einzelschussentgraten: simultanes Laserentgraten durch Maskenabbildung oder defokussiertem Laserstrahl

Die Varianten zur Verfahrensführung werden in Tabelle 5.3 gegenübergestellt. Für das Umschmelzen oder Abtragen der Grate kann jeder Prozessmechanismus eingesetzt werden. Zum Laserspanen ist eine Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück erforderlich, so dass das Einzelschussentgraten (Maskenabbildung) nicht möglich ist. Zum Feinschneiden muss der Laserstrahl entlang der Gratwurzel verfahren werden, welches nur mit dem Konturentgraten realisiert werden kann. Weil beim Einzelschussentgraten der Wirkbereich des Laserstrahls an die Kanten geometrie angepasst werden

	Scanentgraten	Konturentgraten	Einzelschussentgraten
			
Kantengeometrie	2D	3D	2D
Steuerungsaufwand			
Positionieraufwand			
Flexibilität ¹⁾			
Prozesseignung			
Umschmelzen			
Laserspanen			
Mikroabtrag			
Feinschneiden			

1) bei Änderung der Kantengeometrie

Legende: wenig     hoch

Tab. 5.3: Gegenüberstellung der Möglichkeiten zur Verfahrensführung

muss, ist dieses Verfahren insgesamt wenig flexibel. Das Konturentgraten kann in Verbindung mit jedem Prozessmechanismus eingesetzt werden. So ist es insgesamt die flexibelste Form der Verfahrensführung und soll in dieser Arbeit schwerpunktmäßig eingesetzt werden.

5.4.3 Einsetzbare Anlagentechnik

Je nach Verfahrensführung – Scan- oder Konturentgraten – müssen unterschiedlich hohe Bahngeschwindigkeiten des Strahls zur Kante erzeugt werden. Dazu können konventionelle NC-Achsen oder Spiegelscanner eingesetzt werden. In Tabelle 5.4 sind die Möglichkeiten vergleichend gegenübergestellt.

Der Hauptunterschied zwischen beiden Systemen ist, dass mit einem Spiegelscanner nur der Laserstrahl, mit einem Achssystem sowohl der Laserstrahl als auch das Werkstück bewegt werden können. Mit der Kombination mehrerer Achsen lassen sich beliebig viele Freiheitsgrade für die Bewegung erzeugen. Handelsübliche Scanner dagegen sind mit maximal zwei Schwingspiegeln ausgestattet, so dass nur Bewegungen in der Ebene realisiert werden können. Sind für die Positionierung des Laserstrahls mehr als zwei Achsen erforderlich, muss ein Achssystem eingesetzt werden. Ansonsten kann prin-

	NC-Achssystem	Spiegel-Scanner
Freiheitsgrade	beliebig	2
Bewegungsart	Strahl oder Werkstück	Strahl (Spiegel)
Beschleunigung	bis 2 g	bis ≈ 300 g
Vorschub (Kreis) ^{a)}	$v_{\text{Bahn}} = 20 \text{ mm/s}$	$v_{\text{Bahn}} \approx 300 \text{ mm/s}$
Vorschub (linear)	$v < 500 \text{ mm/s}$	$v < 2000 \text{ mm/s}$
Arbeitsraum	unbeschränkt	bis $150 \times 150 \text{ mm}$
Rel. Genauigkeit (abhängig von)	im Sub-Mikrometerbereich (Messsystem)	größer $1 \mu\text{m}$ (Arbeitsraum)
Abs. Genauigkeit	Durch Referenzierung im Bereich der rel. Genauigkeit	im Bereich von $\approx 20 \mu\text{m}$ (keine Referenzierung)
Kosten	Pro Achse: 10–15 TDM Steuerung: 20–40 TDM	bis 50 TDM (Komplettsystem)
Sonstiges		<ul style="list-style-type: none"> • Starke Temperaturempfindlichkeit • Spezielle Objektive zur Fokussierung

^{a)} Erzielbare Kreisbahngeschwindigkeit bei einem Durchmesser von $D=400 \mu\text{m}$

Tab. 5.4: Gegenüberstellung numerisch gesteuerter Achs- und Spiegelscannersysteme zum Konturentgraten

zipiell zwischen einem Achssystem und einem Scanner ausgewählt werden.

Bei Anwendungen, die eine hohe Dynamik der Relativbewegung zwischen Strahl und Kante erfordern, ist es zweckmäßig, einen Spiegelscanner einzusetzen, um das hohe Beschleunigungsvermögen und die hohen Bahngeschwindigkeiten auszunutzen. Dieses gilt insbesondere für das Konturentgraten von Bohrungen mit kleinen Durchmesser, weil in diesem Fall eine hohe Normalbeschleunigung für die Bewegung benötigt wird.

Kapitel 6

Einfluss der Prozessparameter

Auf den Laserentgratprozess wirkt eine Vielzahl von Einflussgrößen, deren Anzahl und Kombination einen komplexen Prozess ausmachen. Im folgenden Abschnitt werden die Einflussgrößen zunächst klassifiziert und anschließend der Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf den Entgratprozess anhand experimenteller Ergebnisse aufgezeigt.

6.1 Übersicht und Einordnung der Parameter

Die den Laserentgratprozess beeinflussenden Parameter können fünf Bereichen zugeordnet werden:

- *Werkstück* mit gratbehafteter Kante
- In der *Strahlquelle* erzeugte Laserstrahlung
- *Strahlführung* des Laserstrahls zur Kante
- Umgebende *Atmosphäre* der Wirkstelle – Prozessgas
- *Verfahrensschritte*

Die Gesamtheit der Parameter des Laserentgratprozesses ist in Abbildung 6.1 in einer Übersicht dargestellt. Während das Werkstück mit seinen Eigenschaften durch die Entgrataufgabe vorgegeben ist, müssen die Parameter der vier übrigen Bereiche so gewählt werden, dass mit dem Laserentgratprozess das geforderte Ergebnis erzielt wird. Wegen der Vielzahl der Parameter kann in dieser Arbeit nur ein Teil der Parameter betrachtet werden, deren Auswahl in den folgenden Abschnitten erläutert wird.

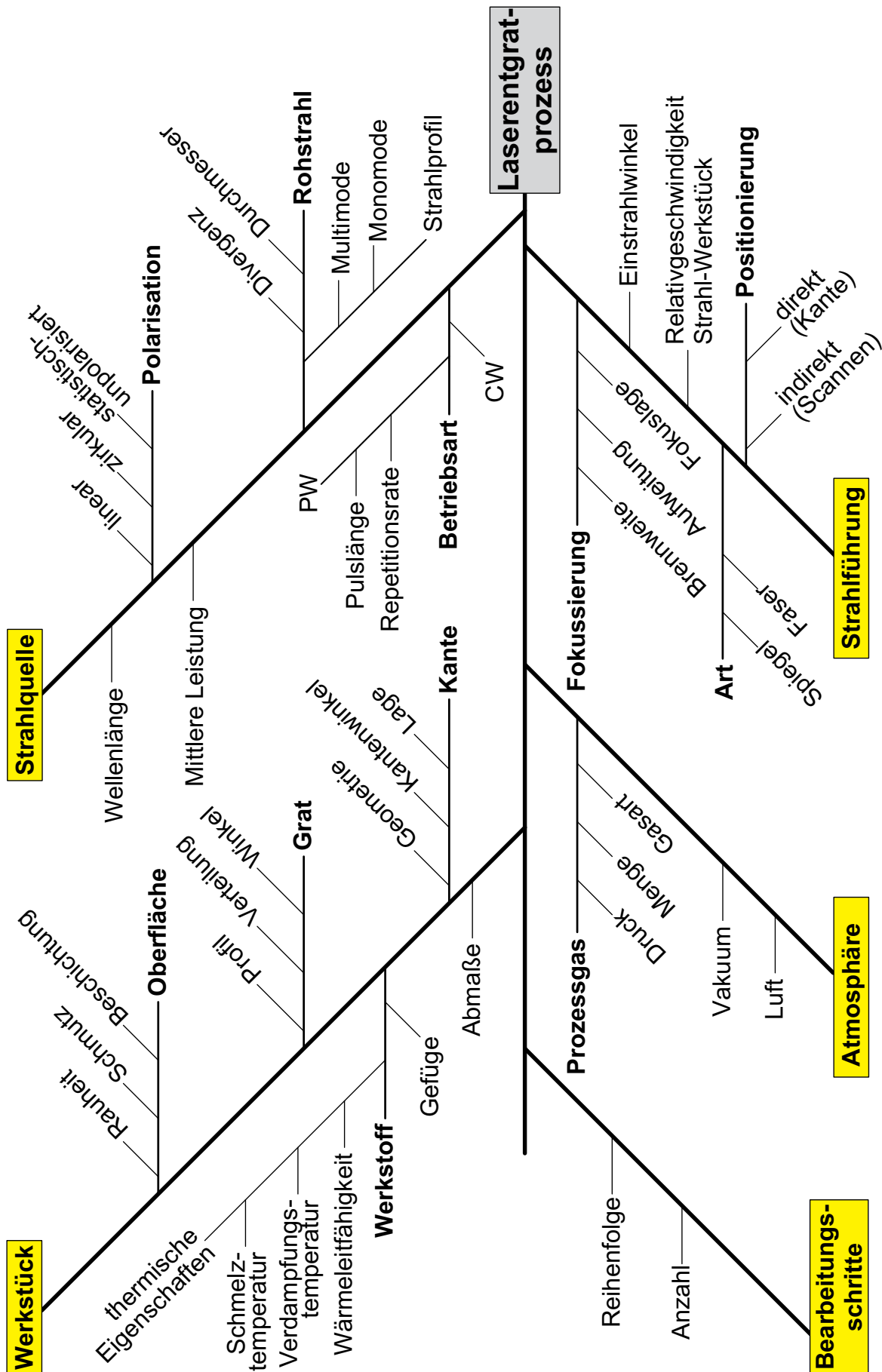


Abb. 6.1: Ishikawa-Diagramm der Einflussgrößen zum Laserentgraten

6.1.1 Parameterauswahl

Gemäß dem im Abschnitt 3 beschriebenen Prozessverständnis zum Laserabtragen sind insbesondere die Intensität I und Dauer t der Laserbestrahlung grundlegende Prozessparameter. Da bei gütegeschalteten Nd:YAG-Lasern Pulsdauer und Intensität zusammenhängen, wird die Betrachtung der Auswirkung der Pulsdauer in dieser Arbeit vernachlässigt aber zwischen kontinuierlicher (cw) und gepulster (pw) Laserstrahlung unterschieden.

Durch die Strahlführung werden die Größe und Lage der Wirkstelle und auch die Abtragrichtung festgelegt. Somit stellen der Einstrahlwinkel, die Strahlpositionierung zur Kante und der Durchmesser des Laserstrahls in der Wirkstelle maßgebliche Parameter dar.

Die Gesamt-Streckenenergie hängt neben den Laserstrahlparametern von der Anzahl der Bearbeitungsschritte und vom Vorschub ab. Da der Materialabtrag neben der Intensität maßgeblich von der in die Wirkstelle eingebrachten Energiemenge abhängt, wirkt sich der Vorschub auch auf die Geometrie der Oberflächenkontur in der Wirkstelle aus. Beim Bearbeiten mit gepulster Laserstrahlung soll der Vorschub durch den Pulsüberlapp beschrieben werden. Insgesamt soll in den experimentellen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit der Einfluss folgender Parameter analysiert werden:

- Mittlere Intensität der Laserstrahlung I_m
- Position des Laserstrahls zur Kante in Form des Strahlüberlapps Δx
- Einstrahlwinkel des Laserstrahls zur Kante α
- Lage des Fokus zur Kante in Strahlrichtung z
- Vorschub in Form des Pulsüberlapps u und der Geschwindigkeit v
- Anzahl der Bearbeitungsschritte n

Nicht betrachtet wird in dieser Arbeit der Einfluss des Prozessgases und unterschiedlicher Strahlquellen. Der Einfluss des Werkstücks auf den Entgratprozess soll nur im Rahmen der ausgewählten Anwendungen berücksichtigt werden.

6.2 Aufbau der Versuchsentgratanlage

Zum Durchführen der Entgratversuche soll ein flexibles Lasersystem eingesetzt werden, so dass Laser-Parameter gezielt variiert werden können. Gütegeschaltete Nd:YAG-Laser bieten die Möglichkeit, sowohl gepulst als auch im Dauerstrichbetrieb zu arbeiten. In Hinsicht auf das Laserabtragen zeigen die Erfahrungen, dass Pulsenergien im Millijoule-Bereich für ein präzises Abtragen geeignet sind. Deswegen wird in dieser Arbeit als Lasersystem ein gütegeschalteter Nd:YAG-Laser gewählt.

6.2.1 Charakterisierung der Versuchsanlage

An die Versuchsanlage werden folgende Anforderungen gestellt:

Laser

- Hohe Pulsspitzenleistungen, um bei hoher Intensität Material verdampfen zu können
- Variationsmöglichkeit vieler Strahlparameter
- Kostengünstiges und für den Industrieinsatz taugliches Lasersystem

Anlagenkonzept

- 2D-Bahnsteuerung zum Abfahren von Kanten geometrien
- Spiegelscanner, um eine hohe Dynamik der Strahlpositionierung zu erreichen

Durch diese Anforderungen begründet wird die Basis der Versuchsentgratanlage durch ein Laserbeschriftungssystem – bestehend aus einem lampengepumpten, güteschalteten Festkörperlaser der Wellenlänge $\lambda=1064\text{ nm}$ und einem Spiegelscanner – realisiert. Den schematischen Anlagenaufbau zeigt Abbildung 6.2.

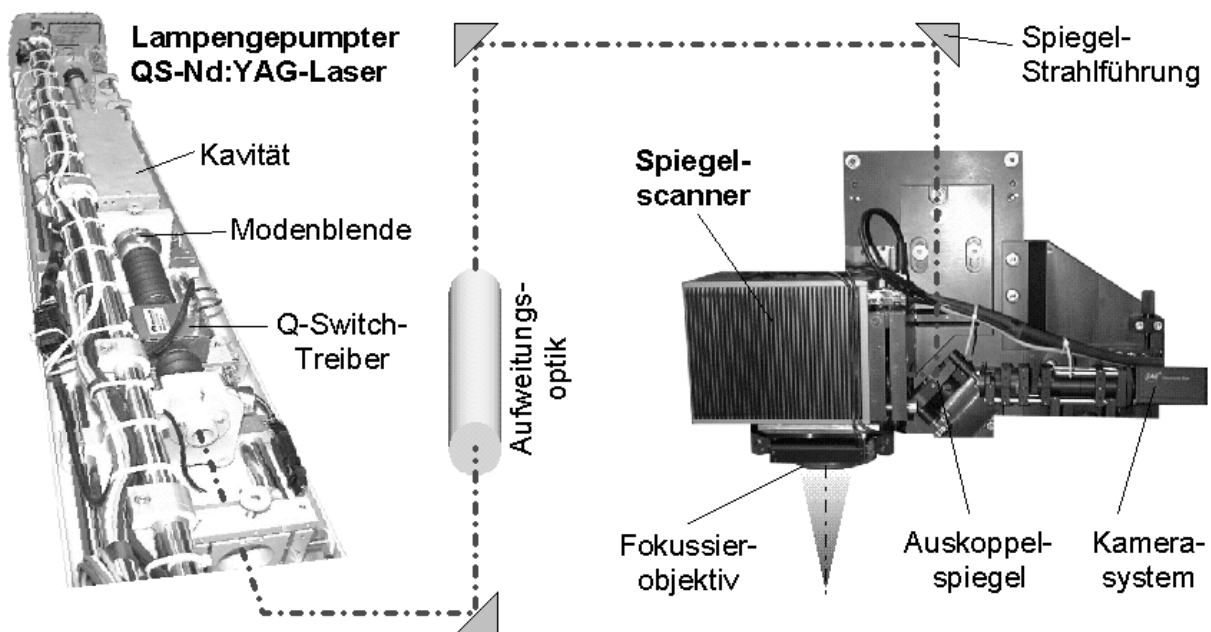


Abb. 6.2: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage zum Laserentgraten

Vom Grundaufbau her arbeitet der eingesetzte Nd:YAG-Laser im Multimode. Durch Einsetzen einer Modenblende ist es aber möglich, ein TEM_{00} -Strahlprofil der Qualität $M^2=1,1$ zu realisieren. Da der Laser mit einer kontinuierlichen Blitzlampe angeregt wird, kann sowohl im kontinuierlichen (cw) als auch aufgrund der Güteschaltung im gepulsten (pw) Betrieb gearbeitet werden. Mit einer Aufweitungs-optik lässt sich der Rohstrahldurchmesser

vergrößern und somit der Strahl an der Bearbeitungsstelle kleiner fokussieren. Um einen Fokusedurchmesser im Bereich von $35\text{ }\mu\text{m}$ zu ermöglichen, muss der Laserstrahl über Spiegel geführt werden, da derzeit keine entsprechend dünnen Lichtleitfasern verfügbar sind. Im Scanner wird der Strahl mittels zweier Schwenkspiegel positioniert und anschließend fokussiert. Das Fokussierobjektiv hat eine Brennweite von $f=100\text{ mm}$ und ist ein „F-Theta“-Objektiv, das unabhängig vom Einstrahlwinkel den Strahl in einer Ebene fokussiert. Die technischen Eckdaten des Lasers der Versuchsanlage sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Nd:YAG-Laser	Modell: Spectron SL 902			
Güteschaltung	opto-akustisch, $f_p = 0\text{--}50\text{ kHz}$			
Wellenlänge	λ	1064 nm		
Max. Leistung	P_{av}	65 W		
<i>Lasermode</i>		Mono ¹⁾	Mono ²⁾	Multi ³⁾
Rohstrahldurchmesser	d_0	5,3 mm	4,3 mm	10,4 mm
Strahlqualität	M^2	1,1	1,1	7,3
Fokusedurchmesser ⁴⁾	d_f	$\approx 28\text{ }\mu\text{m}$	$\approx 34\text{ }\mu\text{m}$	$\approx 95\text{ }\mu\text{m}$

¹⁾: Betrieb mit Modenblende 1,4 mm bei $f_p=4\text{ kHz}$ und Lampenstrom=19 A

²⁾: Betrieb mit Modenblende 1,4 mm bei cw und Lampenstrom=19 A

³⁾: Multimodebetrieb bei cw und Lampenstrom=17 A

⁴⁾: bei 2-facher Aufweitung und Objektivbrennweite $f=100\text{ mm}$

Tab. 6.1: Technische Daten des Lasers der Versuchsanlage

Der Laser und Scanner werden über eine spezielle PC-Steuerung gesteuert und synchronisiert. Die frei wählbaren Systemparameter, die aber im Verlauf einer einzelnen Bearbeitungsspur nicht variiert werden können, sind:

- Lampenstrom der Blitzlampe – von 35–65%
- Pulsrepetitionsrate f_p – cw und pw von 1–50 kHz
- Bahngeschwindigkeit des Laserstrahls v von 0,01–2000 mm/s

Durch die Änderung des Lampenstroms wird in erster Linie die mittlere Leistung des Lasers variiert, dargestellt in Abbildung 6.3a. Aber auch die Stabilität der im Resonator angeregten Moden wird durch den Lampenstrom beeinflusst, was sich auf die Strahlqualität und somit auch auf den Fokusedurchmesser auswirkt. Die optimale Strahlqualität wird bei einem Lampenstrom von 50% (entspricht 16 A) erreicht. Güteschaltungsspezifisch wird bei der Änderung der Repetitionsrate auch die Pulslänge τ_H verändert, die Abhängigkeit der Pulslänge von der Repetitionsrate ist in Abbildung 6.3b dargestellt. Die Güteschaltung kann für zwei Bereiche angesteuert werden. Im oberen Modus kann der Laser nominal bis 100 kHz gepulst werden.

Allerdings sinkt ab ungefähr 20 kHz die Pulsstabilität ab, so dass Fehlpulse auftreten. Die resultierenden mittleren Intensitäten I_m in Abhängigkeit der Repetitionsrate f_p im Multimode- und Betrieb mit Modenblende sind in Abbildung 6.3c aufgetragen.

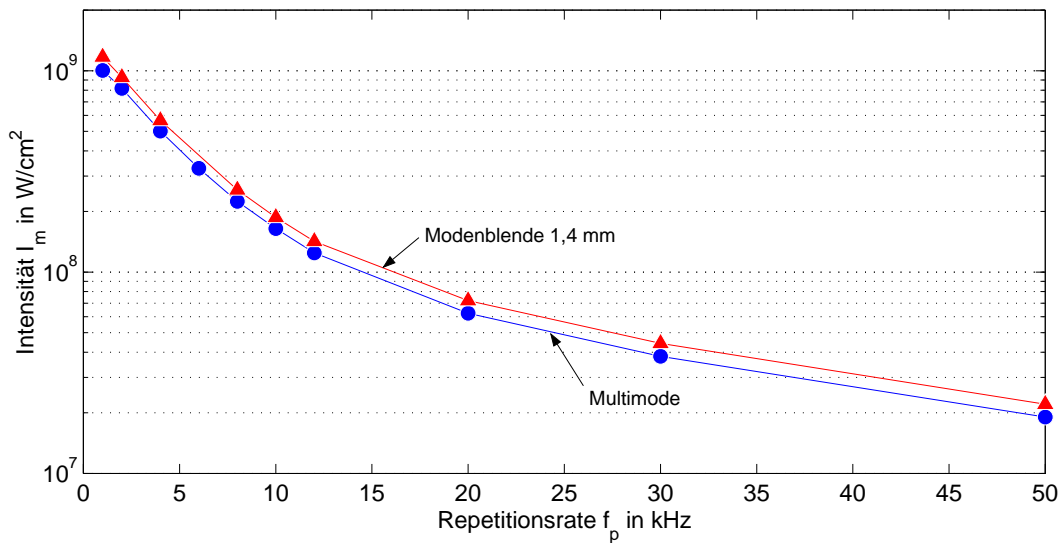
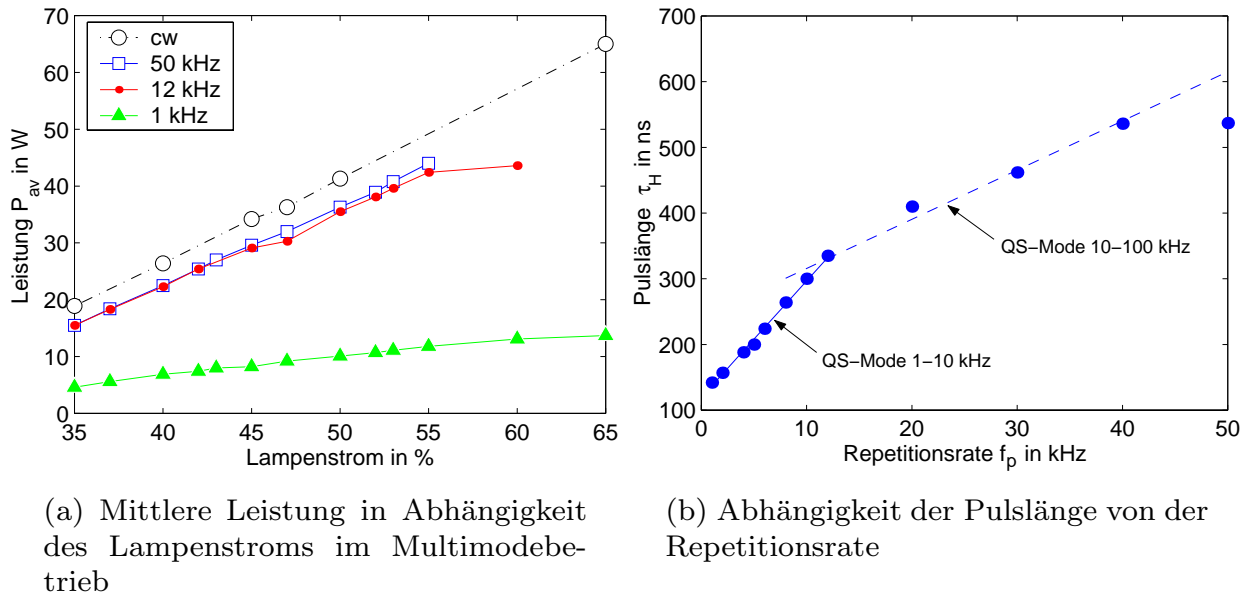


Abb. 6.3: Eigenschaften des eingesetzten Nd:YAG-Lasers

6.2.2 Musterkanten für Entgratversuche

Da der Einfluss der Verfahrensparameter unabhängig von bauteilbezogenen Entgrataufgaben untersucht werden soll, werden die Entgratversuche an „Musterkanten“ durchgeführt. Dazu wird als Kanten­geometrie eine Gerade gewählt, um den Einstrahlwinkel α ohne großen Anlagenaufwand va-

riieren zu können. Weil durch Laserentgraten gemäß dem erarbeiteten Anforderungsprofil kleine Gratgrößen zu entfernen sind, werden die Versuchsmustergrate durch Schleifen erzeugt. Abbildung 6.4 zeigt die Abmessungen der Versuchsteile sowie schematisch die durch Schleifen entstehenden Grate.

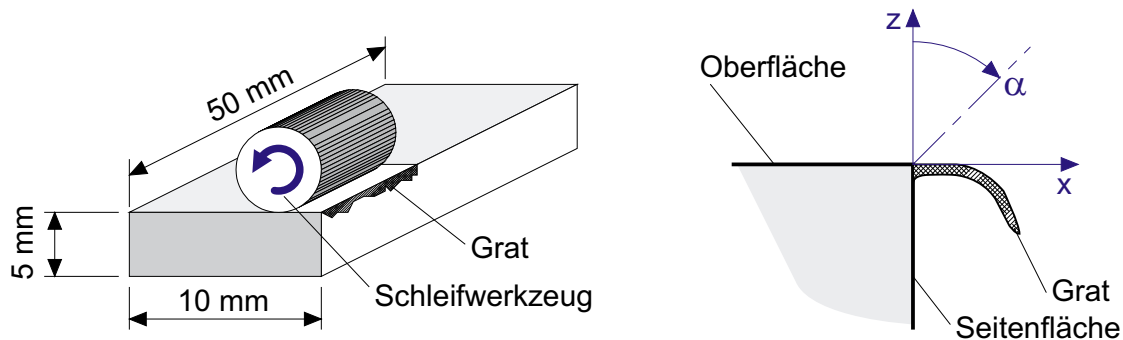


Abb. 6.4: Abmessungen der Versuchsteile und Darstellung der Gratlage am Werkstück

Für die Versuche werden als Werkstoffe ein niedriglegierter Stahl (Ck 85), ein chromlegierter, gut härtbarer Stahl (100 Cr 6) und ein hochlegierter nichtrostender Stahl (X5 CrNi 18 10) betrachtet, deren Werkstoffkennwerte Tabelle 6.2 entnommen werden können. Hinsichtlich der Laserbearbeitung ist hervorzuheben, dass X5 CrNi 18 10 eine ungefähr vier mal schlechtere Wärmeleitfähigkeit als die anderen beiden Stähle aufweist. Aufgrund ihrer unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften entstehen je Werkstoff an den Kanten verschieden große Grate, wie aus Abbildung 6.5 ersichtlich ist.

Die größten Grate bilden sich an den Kanten aus Ck 85, bei denen die maximale Grathöhe h ungefähr $500\text{ }\mu\text{m}$ beträgt. Diese langen Grate sind labil und brechen im Bereich der Gratwurzel leicht ab, wie auch in der Abbildung 6.5a erkennbar ist. Die Grate an den Kanten der Bauteile aus 100 Cr 6 sind kleiner aber auch stabiler. Der Werkstoff X5 CrNi 18 10 bildet wiederum

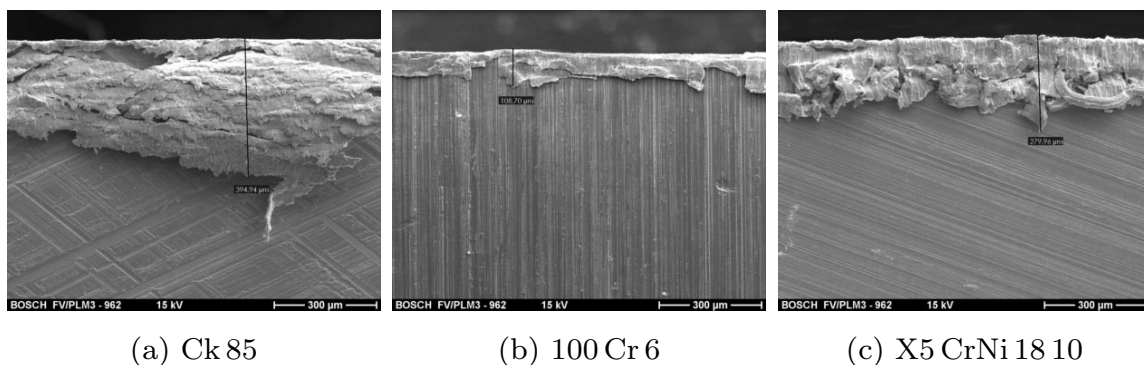


Abb. 6.5: REM-Aufnahmen durch Schleifen erzeugter Mustergrate (Blickrichtung entlang der X-Achse in Abb. 6.4)

größere Grate aus, die ebenfalls stabiler als die Ck 85-Grate sind.

	St 37	Ck 85	100 Cr 6	16 MnCr 5	X5 CrNi 18 10
	Blankstahl		gut härtbar <i>zäh und hart</i>	Einsatzstahl <i>zäh</i>	<i>nichtrostend</i>
Legierungsanteile in [%]	C 0,25	C 0,77–0,93 Si 0,12–0,38 Mn 0,41–0,69	C 0,92–1,13 Si 0,12–0,38 Mn 0,21–0,49 Cr 1,30–1,70 Ni 0,33	C 0,14–0,21 Si 0,12–0,43 Mn 0,96–1,35 Cr 0,74–1,16	C 0,08 Si 1,05 Mn 2,04 Cr 16,8–20,2 Ni 8,4–10,1
Dichte in [kg/m ³]	7800	7800	7850	7850	7920
Härte	193 ¹⁾	160–190 ¹⁾	315–903 ¹⁾	135–165 ²⁾	160 ¹⁾
T_s in [°C]	1530	1480	1460	1530	1398–1454
T_v in [°C]	2880	2890	2895	2880	2945
Wärmeleitungseigenschaften					
c in [J/(kg K)]	461	461	440	440	472
λ in [W/(m K)]	41,7	41,7	44,0	44,0	14,5
Enthalpien in [kJ/kg]					
Schmelzen	272,1				
Verdampfen	6364,0				
Optische Eigenschaften					
Brechungsindex	3,9 + 4,4i				
Absorptionsfaktor	0,36				0,32

¹⁾ Vickershärte HV 10 ²⁾ Brinellhärte HB 5/750

Tab. 6.2: Materialkennwerte für ausgewählte Stähle bei Raumtemperatur
(Quellen: [18, 93, 94])

6.3 Geometrische Kennwerte für laserentgratete Kanten

Um Entgratergebnisse anhand der erzielten Kantengeometrie quantitativ beurteilen zu können, hat Schäfer die Kantenfehlbreite b_k und den Radius der Kantenverrundung r_k als Messgrößen eingeführt (Abschnitt 2.1). Da aber auch mit dem Kantenmaß a die Kantengeometrie nicht vollständig beschrieben wird, sollen für diese Arbeit weitere Kenngrößen definiert werden. Die Gesamtheit der Maße zur Beschreibung einer laserentgrateten Kante ist in Abbildung 6.6 skizziert.

Zu unterscheiden ist zwischen einer ideal und real verrundeten Kante. Bei einer idealen Verrundung entspricht das Kantenmaß a dem Verrundungsradius r_k , der Fasenwinkel φ beträgt 45°. Der Kantenabtrag, der durch die Kantenprofilfehlfläche F quantifiziert werden soll, und die Kantenfehlbreite

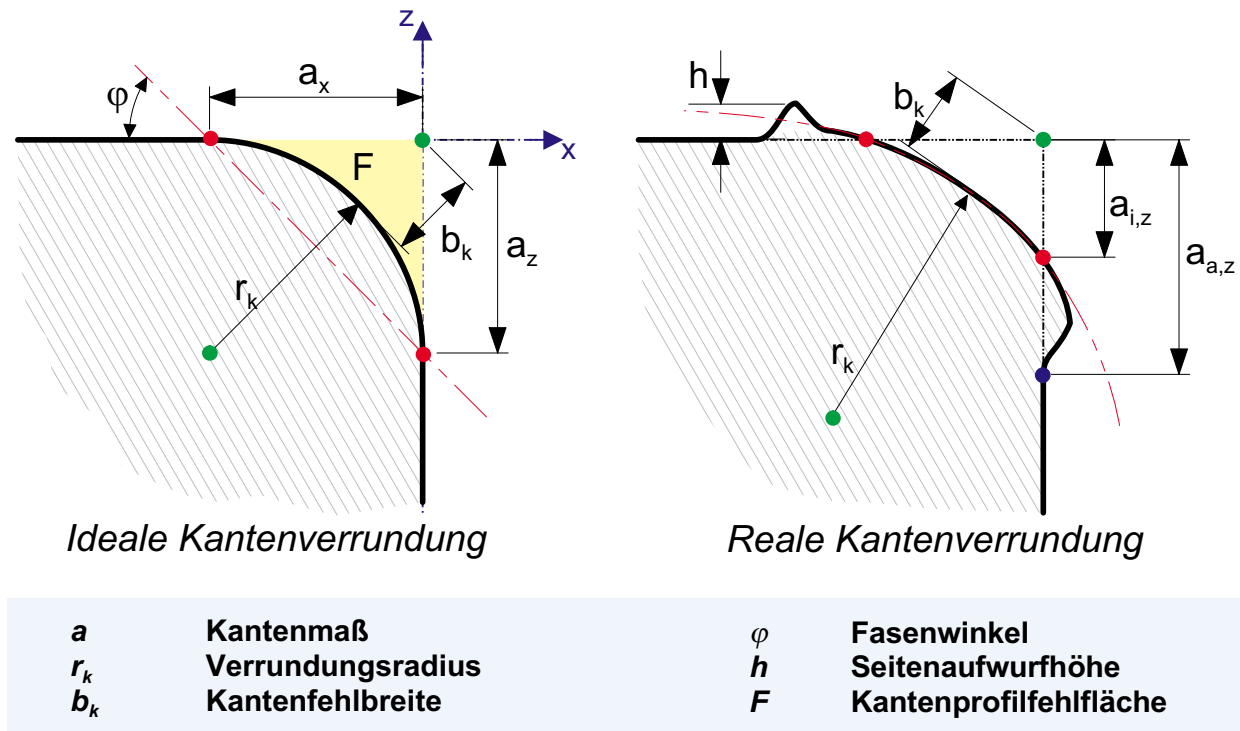


Abb. 6.6: Kenngrößen zur Bemaßung einer laserentgrateten Kante

b_k können dann über das Kantenmaß a berechnet werden.

Bei einer realen Verrundung beträgt der Fasenwinkel im allgemeinen nicht 45° . Außerdem können durch die Laserbearbeitung Aufwürfe entstehen, die als Sekundärgrate anzusehen sind. Deswegen soll in dieser Arbeit zwischen dem Kanteninnen- und Kantenaußenmaß unterschieden werden, wobei das Kantenaußenmaß den Aufwurf einschließt. Dementsprechend sind auch zwei Kantenprofilfehlflächen F_a und F_i zu unterscheiden. Aus der Differenz $F_a - F_i$ ergibt sich die Profilfläche der Aufwürfe bzw. Sekundärgrate. Positive Zahlenwerte für F_a bedeuten, dass die Profilfläche der Aufwürfe größer als die abgetragene Fläche ist.

Der Verrundungsradius entspricht der Krümmung eines virtuellen Kreises (Berechnung einer Ausgleichskurve) durch die verrundete Kante und ist ein Maß für die Form der Verrundung. Einer konkaven Form der Kantenverrundung wird ein negativer Verrundungsradius zugeordnet.

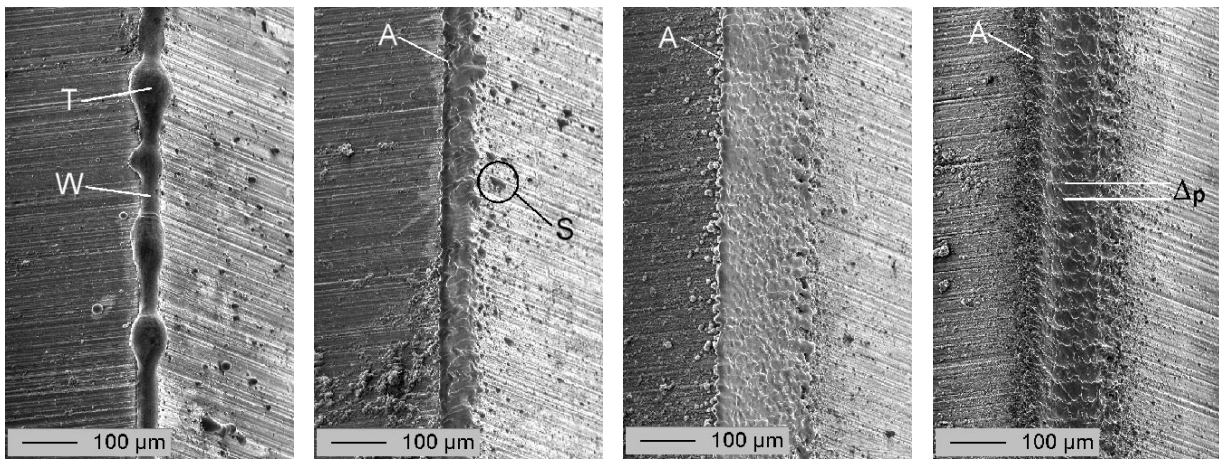
Die Kantenmaße sind jeweils den Seiten der Kante zuzuordnen: das Kantenmaß, dessen Richtung der Strahlrichtung z zugeordnet werden kann, wird als paralleles Kantenmaß a_z und das zum Laserstrahl normale, als laterales Kantenmaß a_x bezeichnet. Nur bei einem Einstrahlwinkel von 45° kann nicht zwischen lateralem und parallelem Kantenmaß unterschieden werden, so dass für diesen Fall jeweils eine spezielle Zuordnung zu treffen ist.

6.4 Experimentelle Ergebnisse

6.4.1 Intensität der Laserstrahlung

Die Intensität der Laserstrahlung lässt sich beim eingesetzten Lasersystem am stärksten über die Pulsrepetitionsrate f_p variieren (siehe Abb. 6.3c). Um die Streckenenergie E_s konstant zu halten, muss deshalb der Vorschub v angepasst werden, so dass sich auch der Pulsüberlapp u ändert. Die Auswirkung einer variierten mittleren Intensität I_m bei konstanter Streckenenergie E_s auf das Entgratergebnis ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

REM-Aufnahmen der Kanten unter 45° Blickwinkel



Schliffbilder der Kantenprofile

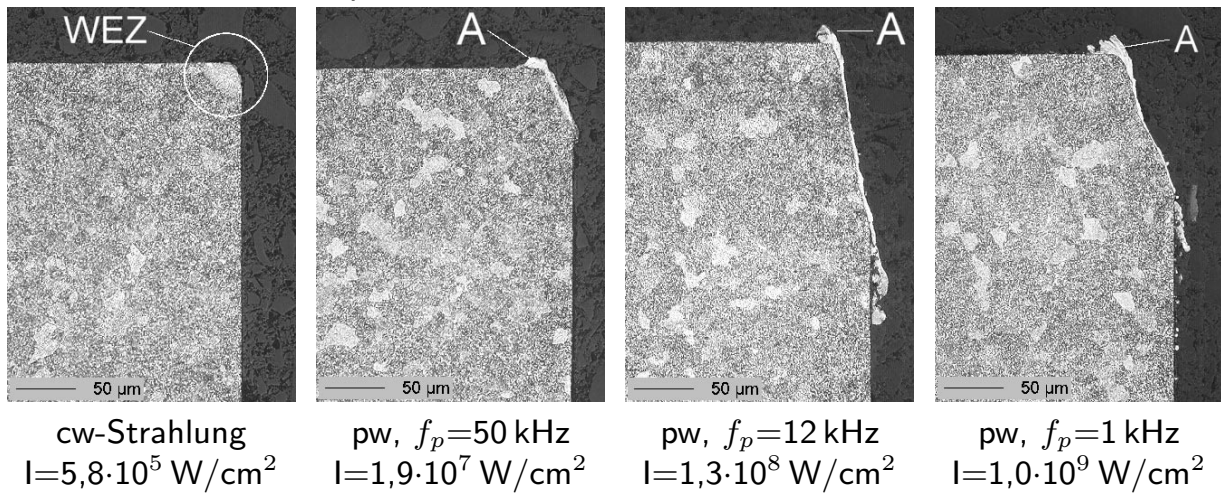


Abb. 6.7: Auswirkung der Intensität I auf die Kantenoberfläche sowie das Kantenprofil und die Wärmeeinflusszone bei konstanter Streckenenergie E_s (Parameter: Werkstoff 100 Cr 6, $\alpha=0^\circ$, $n=10$, $d_f=95\mu\text{m}$)

Für cw-Strahlung geringer Intensität (unterhalb der Abtragschwellintensität von ungefähr $1-2 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$) zeigen die REM-Aufnahmen in Abbildung 6.7, dass eine unregelmäßige, wulstförmige Verrundung W entlang der Kan-

tenlänge erzeugt wird. Außerdem ist die Ausbildung von tropfenförmigen Wulstverdickungen T zu erkennen. An den Stellen des geringen Wulstes W hat die Wärmeeinflusszone WEZ eine Größe von ungefähr $25\text{ }\mu\text{m}$, wie dem Schliffbild entnommen werden kann.

Bei gepulster Laserstrahlung wird neben der Gratentfernung ein Kantenabtrag in Form einer Fase ($r_k=\infty$) erreicht. Auf den anliegenden Oberflächen lagern sich Schmelzspritzer S ab, die auf der oberen Fläche Schmelzaufwürfe A bilden. Der größte Abtrag (Kantenfehlprofil F) ergibt sich bei $I_m=1,3\cdot 10^8\text{ W/cm}^2$. In diesem Fall ist auch die Flanke der Fase am steilsten und das parallele Kantenmaß a_z hat ein Maximum. Die wellenförmige Oberfläche, die sich bei $f_p=1\text{ kHz}$ ergibt, ist eine Abbildung des Pulsvorschubs von $\Delta_p=37,4\text{ }\mu\text{m}$.

Zum quantitativen Vergleich des Abtrags sind in Abbildung 6.8 die abgetragene Profilfläche ohne Aufwürfe F_i und der Flankenwinkel der Kantenverrundung φ_i über der mittleren Intensität I_m aufgetragen. Bei geringer Intensität kann der im Verhältnis zum 100Cr6-Grat große X5CrNi1810-Grat nicht entfernt werden. Nimmt die Intensität zu, steigt der Kantenabtrag bis er im Bereich von $1\text{--}3\cdot 10^8\text{ W/cm}^2$ ein Maximum erreicht. In diesem Bereich ist auch der Winkel der Kantenverrundung φ am steilsten. Durch weiter zunehmende Intensität reduziert sich der Abtrag. Bei annähernd gleichbleibendem lateralen Kantenmaß a_x verkleinert sich dann das parallele Kantenmaß a_z , so dass der Winkel φ verringert wird.

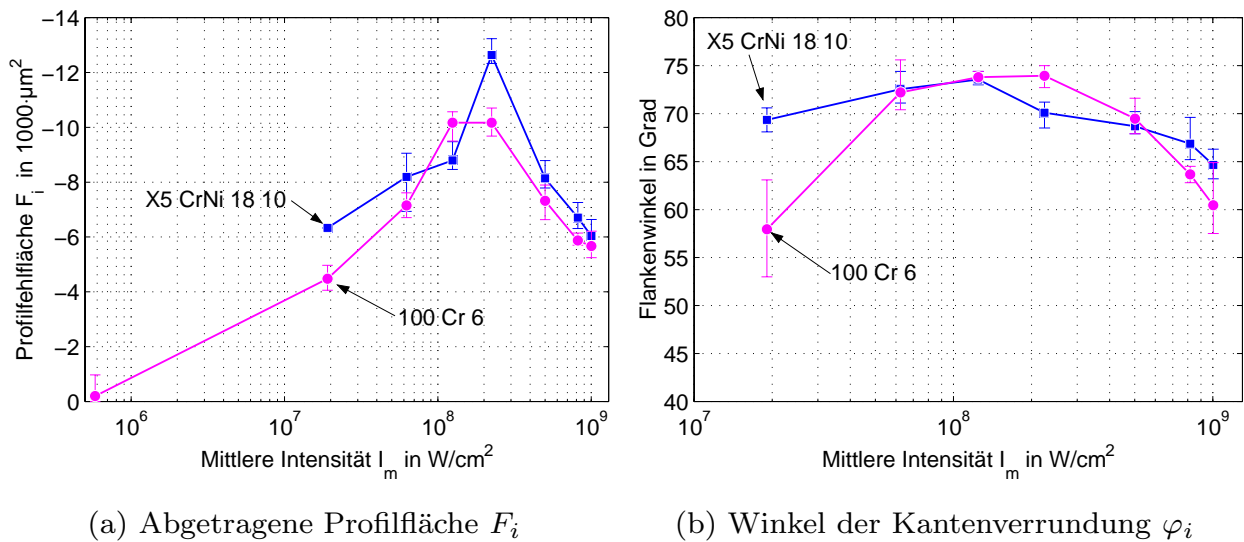


Abb. 6.8: Auswirkung der mittleren Intensität I_m bei konstanter Streckenenergie E_s auf den Kantenabtrag unter Einstrahlwinkel $\alpha=0^\circ$ (Parameter: $n=10$, $d_f=95\text{ }\mu\text{m}$)

6.4.1.1 Mittlere Laserleistung

Wird beim eingesetzten Lasersystem der Lampenstrom variiert, ändert sich die mittlere Leistung P_{av} . Im Gegensatz einer Pulsrepetitionsratenänderung bleibt bei einer Änderung des Lampenstroms die Pulslänge τ_H konstant. Bei gepulster Laserstrahlung mit $f_p=1\text{ kHz}$ im hohen Intensitätsbereich wirkt sich die Änderung der mittleren Leistung über den Lampenstrom nicht eindeutig messbar auf das Kantenprofil aus. Im unteren Intensitätsbereich bei $f_p=50\text{ kHz}$ hingegen steigert eine höhere mittlere Leistung den Abtrag, wie der Abbildung 6.9a entnommen werden kann.

Zwei Fälle sollen betrachtet werden:

- durch eine höhere Laserleistung P_{av} wird die Intensität I_m und die Streckenenergie E_s erhöht,
- bei einer gleichzeitigen Erhöhung des Vorschubs v kann trotz wachsender Intensität die Streckenenergie konstant gehalten werden.

In Abbildung 6.9a ist erkennbar, dass sich der Abtrag sowohl aufgrund der erhöhten Intensität als auch aufgrund der Streckenenergie steigert. Dabei beruht der erhöhte Abtrag in erster Linie auf einem größer werdenden parallelen Kantenmaß a_z (Abb. 6.9b).

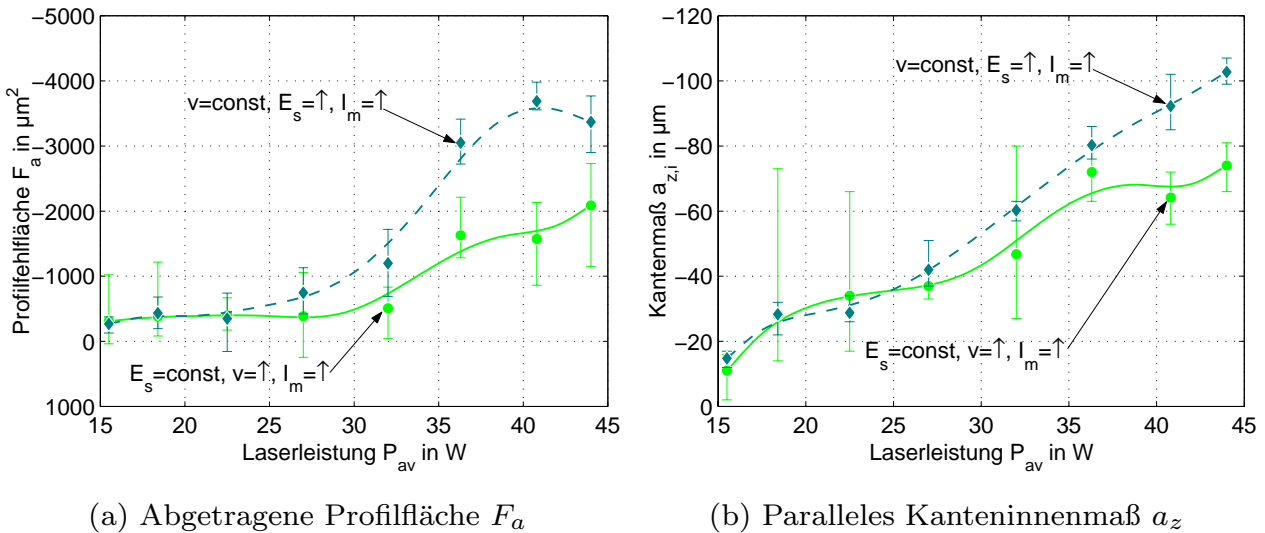


Abb. 6.9: Auswirkung der mittleren Laserleistung P_{av} auf den Kantenabtrag bei $f_p=50\text{ kHz}$ (Parameter: Werkstoff 100 Cr 6, $\alpha=0^\circ$, $n=2$, $v_0=57,4\text{ mm/s}$)

6.4.2 Strahlführungsparameter

6.4.2.1 Lateraler Versatz – Strahlüberlapp

Bei einem Winkel des Laserstrahls zur Kante von $\alpha=0^\circ$ wird durch die laterale Strahlposition x der Anteil der Strahlüberdeckung (Strahlüberlapp) mit dem Grat und der Kante bestimmt. Die Strahlüberdeckung wirkt sich somit auf die absorbierte Energie aus. Bei Laserstrahlung mit einem TEM_{00} -Intensitätsprofil wird durch den Strahlüberlapp aber auch die Höhe der mittleren Intensität beeinflusst.

Bei der Position $x=0$ ($\Delta x/d_f=0\%$) trifft die Strahlachse auf die Kante bzw. Gratwurzel, so dass unter einem Einstrahlwinkel von $\alpha=0^\circ$ 50% der Strahlenergie auf die Kante einwirken. Ist der Strahl zu weit auf der Werkstückoberfläche positioniert ($\Delta x/d_f=-100\%$), wird der Grat nicht entfernt, sondern auf der anliegenden Werkstückoberfläche eine Nut abgetragen. Dieses ist an den in Abbildung 6.10 dargestellten, gemessenen Kantenprofilen erkennbar. Ebenfalls wird der Grat nicht vollständig entfernt, wenn der Laserstrahl zu weit außerhalb des Werkstücks positioniert wird ($\Delta x/d_f > 95\%$).

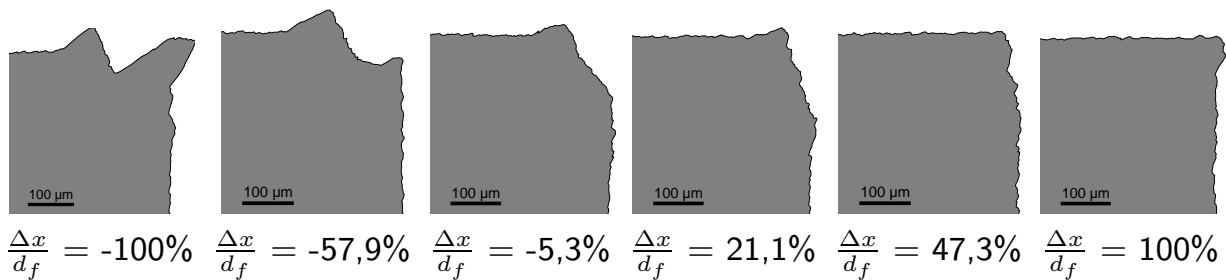


Abb. 6.10: Kantenprofile in Abhängigkeit des Strahlüberlapps (Parameter: Werkstoff 100 Cr 6, $\alpha=0^\circ$, $I_m=1 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$, $d_f=95 \mu\text{m}$, $n=10$)

In Abbildung 6.11 ist der Einfluss des Strahlüberlapps auf die Kantenmaße dargestellt. Sowohl bei den Gratkanten aus 100 Cr 6 als auch aus X5 CrNi 18 10 hängt das laterale Kanteninnenmaß $a_{x,i}$ näherungsweise proportional von der Strahlposition ab. Positive Kantenmaße a_x bedeuten, dass ein Restgrat an der Kante verbleibt. Die größten parallelen Kantenmaße a_z ergeben sich, wenn der Strahl nahe der Gratwurzel ($0\% < \Delta x/d_f < 40\%$) positioniert wird.

Der Einfluss des Strahlüberlapps auf die Bildung von Aufwürfen an der Kante ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Die Höhe des lateralen Aufwurfs (Abb. 6.12a) sinkt mit abnehmender Überlappung des Strahls zur Kante. Während die Aufwurfhöhe bei hoher Intensität ($I_m=1,0 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$) nahezu kontinuierlich abnimmt, ergibt sich bei geringer Intensität ($I_m=1,9 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$) ein sprunghafter Abfall im Bereich um $\Delta x/d_f=-60\%$. Auch bei der Höhe des

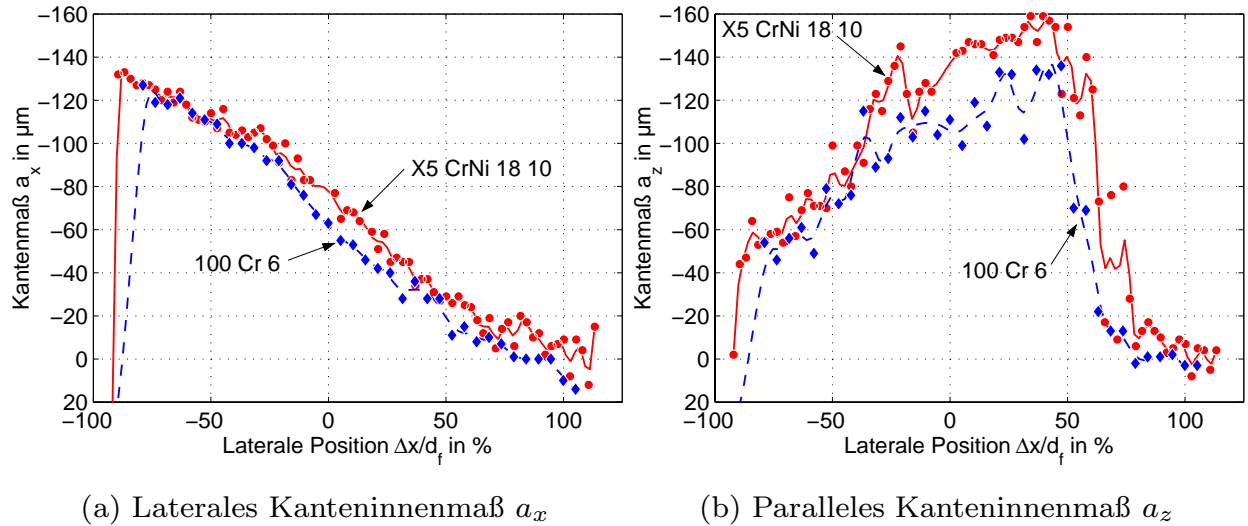


Abb. 6.11: Auswirkung des Strahlüberlapps Δx auf die Kantenmaße a bei Bestrahlung unter $\alpha=0^\circ$ (Parameter: $I_m=1\cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$, $d_f=95 \mu\text{m}$, $n=10$, $v=37,4 \text{ mm/s}$)

parallelen Aufwurfs (Abb. 6.12b) ist ein Unterschied zu erkennen. Das Aufwurfsmaximum für hohe Intensitäten stellt sich bei einer Strahlpositionierung innerhalb der Werkstückoberfläche ein, bei geringer Intensität hingegen ergeben sich die höchsten Aufwürfe bei einer Strahlpositionierung außerhalb der Werkstückoberfläche. Da sich die Aufwürfe durch aus der Wirkstelle ausgetriebene Schmelze bilden, kann daraus geschlossen werden, dass die Intensität einen Einfluss auf die Richtung des Schmelzaustriebs hat.

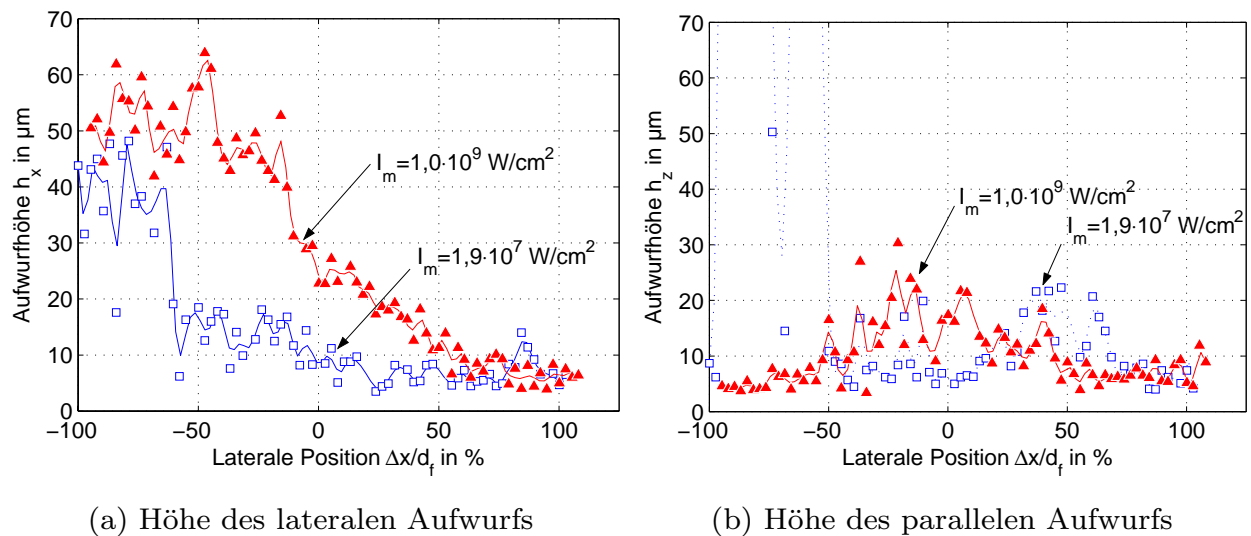


Abb. 6.12: Aufwürfe in Abhängigkeit des Strahlüberlapps und der mittleren Intensität (Parameter: Werkstoff X5 CrNi 18 10, $\alpha=0^\circ$, $d_f=95 \mu\text{m}$, $n=10$)

6.4.2.2 Einstrahlwinkel des Laserstrahls zum Grat

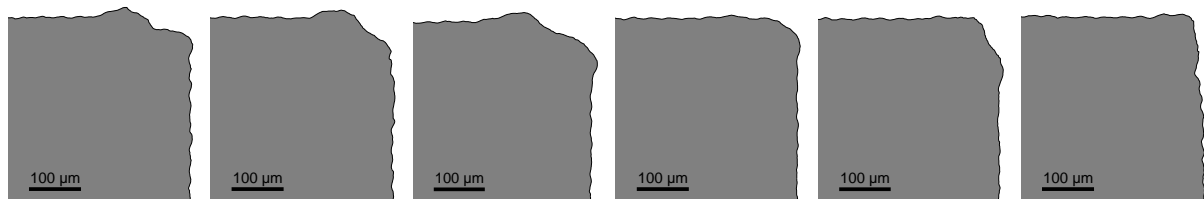
Der Einstrahlwinkel α zum Grat bzw. zur Kante wirkt sich auf die beaufschlagte Intensität und Energie aus. In Abbildung 6.13 sind Kantenprofile dargestellt, die durch Entgraten mit variiertem Einstrahlwinkel α erzeugt wurden. Generell zu unterscheiden ist das Entgraten mit gepulster Laserstrahlung hoher Intensität (Fall 1) und cw-Laserstrahlung geringerer Intensität (Fall 2).

Im Fall 1 wird ein Abtrag an der Kante erzeugt, wobei sich zwischen $\alpha=0^\circ$ und 45° nur der Unterschied zeigt, dass sich bei $\alpha=45^\circ$ ein Aufwurf an beiden Seitenflächen bildet. Schirmt der Grat die beaufschlagte Seitenfläche ab, so ergibt sich ein geringerer Kantenabtrag, wie aus dem Vergleich zwischen der Kontur für $\alpha=0^\circ$ und 90° entnommen werden kann. Bei $\alpha=165^\circ$ ist die absorbierte Intensität auf der Seitenfläche so gering, so dass nur ein geringer Abtrag und eine scharfkantige Kante erzielt wird.

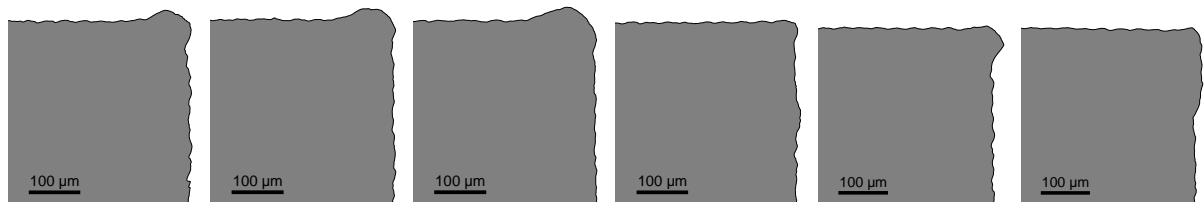
Im Fall 2 wird der Grat zu einem Wulst umgeschmolzen und nur ein sehr geringer Abtrag erzielt. Die Lage des verbleibenden Schmelzwulstes wird durch den Einstrahlwinkel beeinflusst und zeigt der Richtung der Strahlachse angenähert entgegen.

Der Unterschied zwischen geringer und hoher Intensität soll durch die Schliffbilder in Abbildung 6.14 verdeutlicht werden. Zu erkennen ist, wie bei cw-Strahlung kein Abtrag erfolgt, sondern ein Schmelzwulst entsteht, dessen Lage vom Einstrahlwinkel α abhängt. Bei gepulster Strahlung, die einen Abtrag bewirkt, hängt die Abtragrichtung vom Einstrahlwinkel ab. So wird

1) Hohe Intensität bei pw-Strahlung $I_m = 1,0 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$



2) Geringe Intensität bei cw-Strahlung $I_m = 5,8 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$



$\alpha=-45^\circ$ $\alpha=0^\circ$ $\alpha=45^\circ$ $\alpha=90^\circ$ $\alpha=135^\circ$ $\alpha=165^\circ$

Abb. 6.13: Kantenprofile in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels α und der Intensität (Parameter: Werkstoff 100 Cr 6, $n=5$, $d_f=95 \mu\text{m}$, $\Delta x=0$, $E_{s,pw}=1,35 \text{ J/mm}$, $E_{s,cw}=2,34 \text{ J/mm}$)

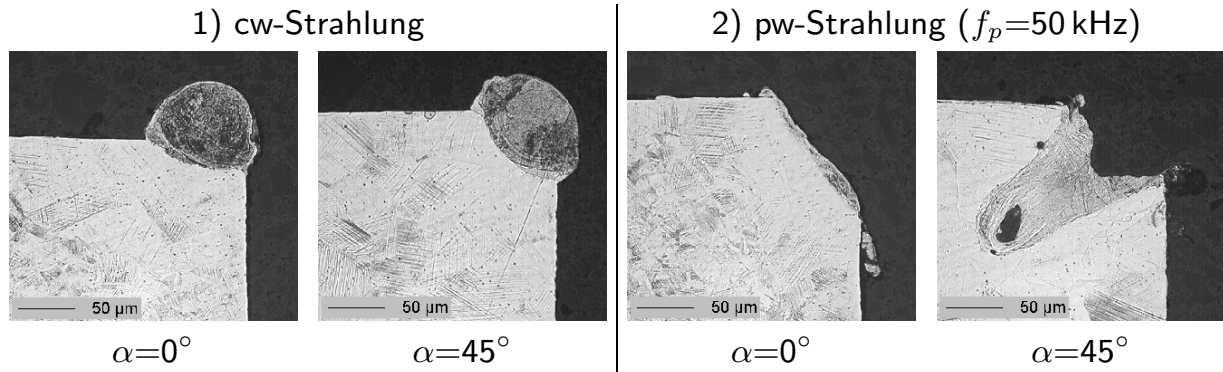


Abb. 6.14: Auswirkung des Einstrahlwinkels α auf das Kantenprofil bei pw- und cw-Strahlung (Parameter: Werkstoff X5CrNi1810, $n=10$, $I_{m,cw} = 5,8 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$, $I_{m,50 \text{ kHz}} = 1,9 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$)

bei $\alpha=45^\circ$ und 10 Bearbeitungsschritten eine Nut in die Kante eingebracht, die im dargestellten Schlichtbild mit Schmelze gefüllt ist.

Im Bereich des Einstrahlwinkels zwischen $\alpha = 0^\circ$ bis 45° nimmt die mittlere Intensität auf der oberen Fläche um den Faktor $\cos(\alpha)$ ab und auf der Seitenfläche um den Faktor $\sin(\alpha)$ zu. Somit steigt insgesamt die in den Kantenbereich eingebrachte Streckenenergie. In Abbildung 6.15a ist die abgetragene Kantenprofilfläche über dem Einstrahlwinkel aufgetragen. Dabei kann für die eingesetzte Intensität zwischen der Kantenprofilfehlfläche und dem Einstrahlwinkel kein eindeutiger Zusammenhang erkannt werden. An dem ebenfalls im Rahmen der Toleranz gleichbleibenden gemittelten Kantenmaß (Abb. 6.15b) zeigt sich, dass bei den gewählten Parametern sich der

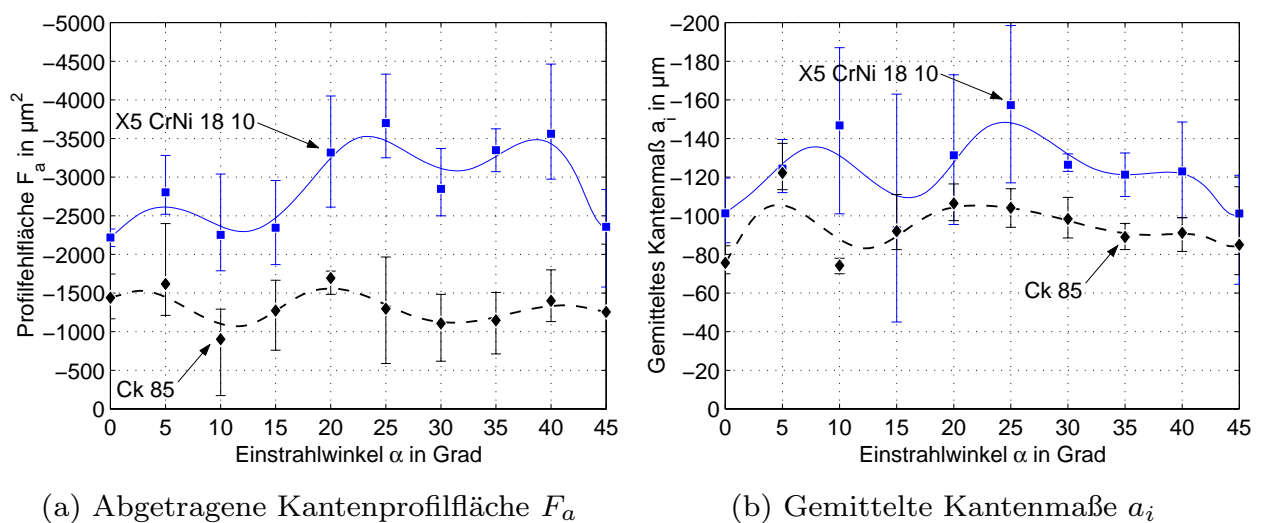


Abb. 6.15: Auswirkung des Einstrahlwinkels und Werkstoffs auf den Kantenabtrag bei gepulster Laserstrahlung geringer Intensität $I_{m,50 \text{ kHz}} = 1,9 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ (Parameter: $n=1$, $d_f=95 \mu\text{m}$, $v=57,4 \text{ mm/s}$, $E_s=0,63 \text{ J/mm}$)

Einstrahlwinkel nicht auf die Größe, sondern nur geringfügig auf die Form der Kantenverrundung auswirkt.

Bei einem Einstrahlwinkel von $\alpha=45^\circ$ ändert sich aufgrund der Strahlposition zur Kante nicht die Menge der absorbierten Energie. Dementsprechend bleibt die abgetragene Kantenprofilfläche F konstant. Die Strahlposition bei $\alpha=45^\circ$ hat einen Einfluss auf das Verhältnis der beiden Kantenmaße a_x und a_z und somit auch auf den Winkel der Kantenverrundung φ .

6.4.2.3 Fokusslage zum Grat

Durch die Fokusslage wird der Strahldurchmesser d_w und somit auch die mittlere Intensität in der Wirkstelle beeinflusst. Bei $z=0$ befindet sich die Strahltaile auf der Kante, negative Werte für z bedeuten, dass der Fokus über dem Werkstück liegt.

Im Diagramm 6.16a ist für einen Einstrahlwinkel von $\alpha=0^\circ$ das laterale Kantenmaß a_x über der Fokusslage aufgetragen. Das kleinste Kantenmaß a_x wird bei minimalem Fokusdurchmesser und maximaler Intensität erzielt. Der Flankenwinkel der Kantenverrundung φ ist in Abbildung 6.16b dargestellt. Minimale Kantenmaße a_x und steilste Winkel φ bei Fokusslagen im Bereich $0 < z < 0,5 \text{ mm}$ bedeuten maximale parallele Kantenmaße a_z in diesem Bereich. Dieses gilt sowohl für gepulste (A) als auch kontinuierliche Laserstrahlung (B).

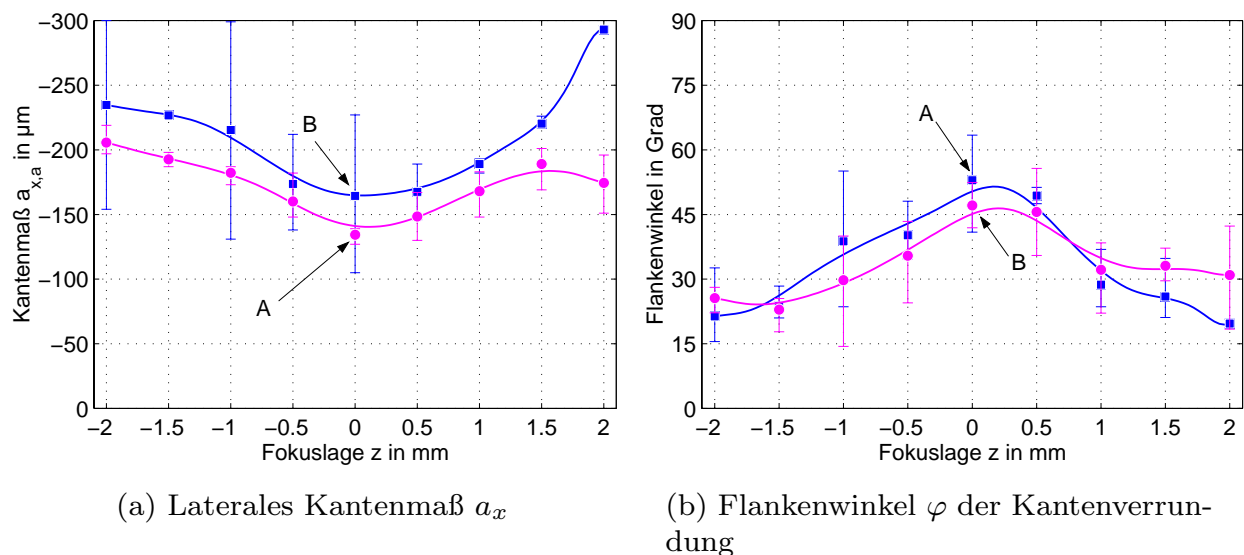


Abb. 6.16: Einfluss der Fokusslage auf die Geometrie der Kantenverrundung bei $\alpha = 0^\circ$ (Fokussierung: $d_f=95 \mu\text{m}$, $z_R=0,92 \text{ mm}$)

A) 100 Cr 6, pw-Strahlung: $I_{m,1 \text{ kHz}} = 1,0 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$, $E_s=1,35 \text{ J/mm}$

B) X5 CrNi 18 10, cw-Strahlung: $I_m = 5,8 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$, $E_s=41,3 \text{ J/mm}$

6.4.3 Parameter der Streckenenergie

6.4.3.1 Bearbeitungsschritte

Gepulste Laserstrahlung hoher Intensität

Abbildung 6.17 zeigt Mikroskopaufnahmen von Kanten, die mit gepulster Laserstrahlung hoher Intensität entgratet wurden. Bereits mit einem Bearbeitungsschritt werden die Grate *A* aus 100Cr6 entfernt und die Kantenverrundung *B* erzeugt. Teilweise verbleiben jedoch kleine Restgrate *C* an der Kante, die mit fortlaufenden Bearbeitungsschritten entfernt werden. Ab $n=4$ Bearbeitungsschritten bleibt das laterale Kantenmaß konstant, während die Rauigkeit der Kantenverrundung sinkt.

Bei den größeren Graten aus X5CrNi1810 wird im ersten Bearbeitungsschritt zwar die Gratfahne durch- jedoch nicht vollständig abgetrennt. Die-

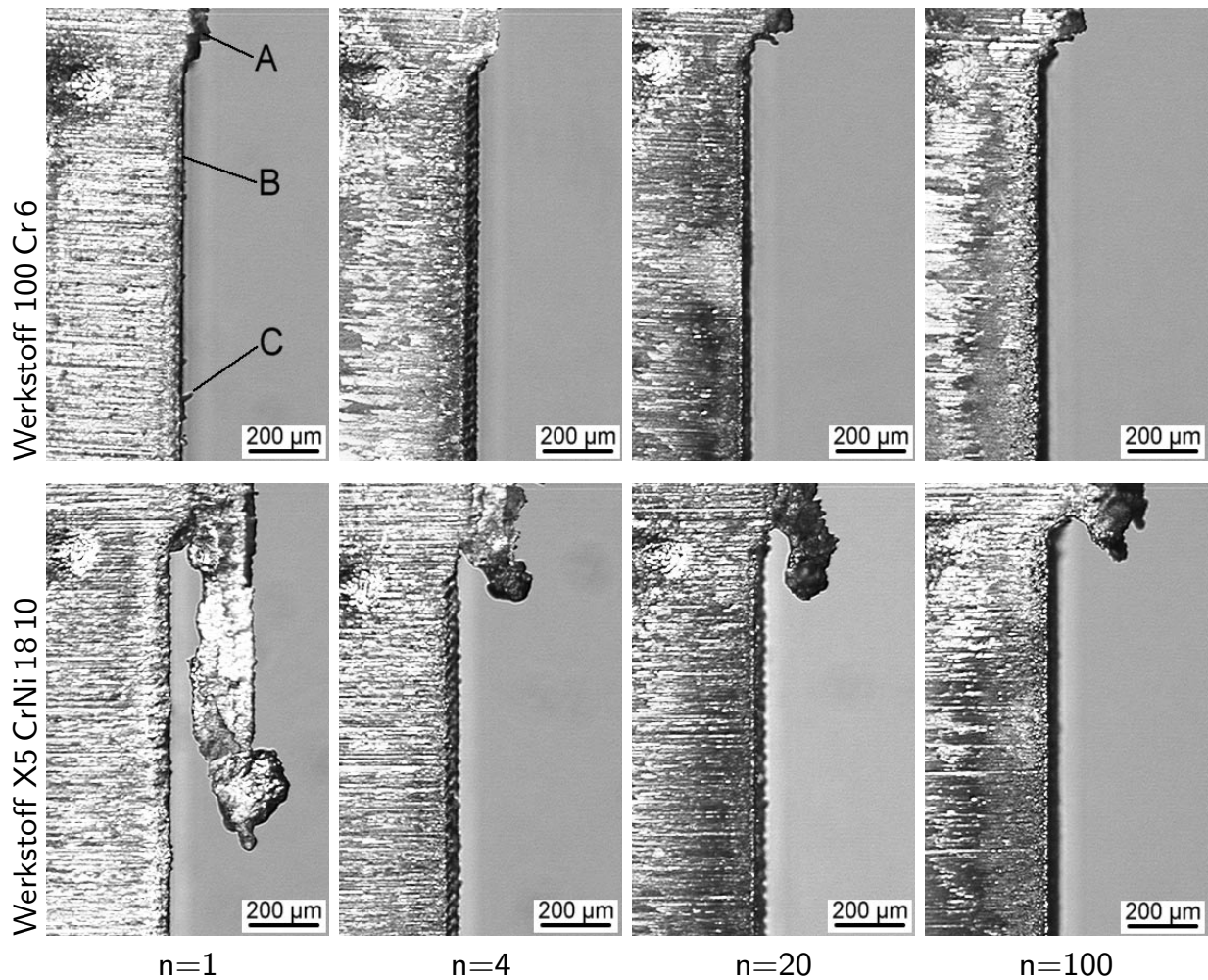


Abb. 6.17: Auswirkung der Bearbeitungsschritte n auf das Entgratergebnis bei gepulster Strahlung unter $\alpha = 0^\circ$ (Mikroskopaufnahmen unter dem Blickwinkel 0° , Parameter: $I_{m,1\text{ kHz}} = 1,0 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$, $v=37,4 \text{ mm/s}$)

ses wird durch die fortlaufenden Bearbeitungsschritte erreicht. Bei 4 und 20 Bearbeitungsschritten zeigt sich eine raue Kantenverrundung B , die durch weitere Bearbeitungsschritte wie auch bei den Kanten aus 100Cr6 zunehmend glatter wird.

Im Diagramm 6.18a sind die abgetragenen Kantenprofilflächen F über den Bearbeitungsschritten bei einem Einstrahlwinkel von 0° aufgetragen. Im Bereich $n < 20$ besteht ein angenähert linearer Zusammenhang zwischen den Bearbeitungsschritten und der abgetragenen Profilfläche. Ebenso steigert sich die Profilfläche der Aufwürfe, die sich aus der Differenz $F_a - F_i$ ergibt. Am Verlauf des Flankenwinkels φ im Diagramm 6.18b ist erkennbar, dass durch die Bearbeitungsschritte bei $\alpha=0^\circ$ in erster Linie das Kantenmaß a_z vergrößert wird und sich somit steilere Winkel φ ergeben.

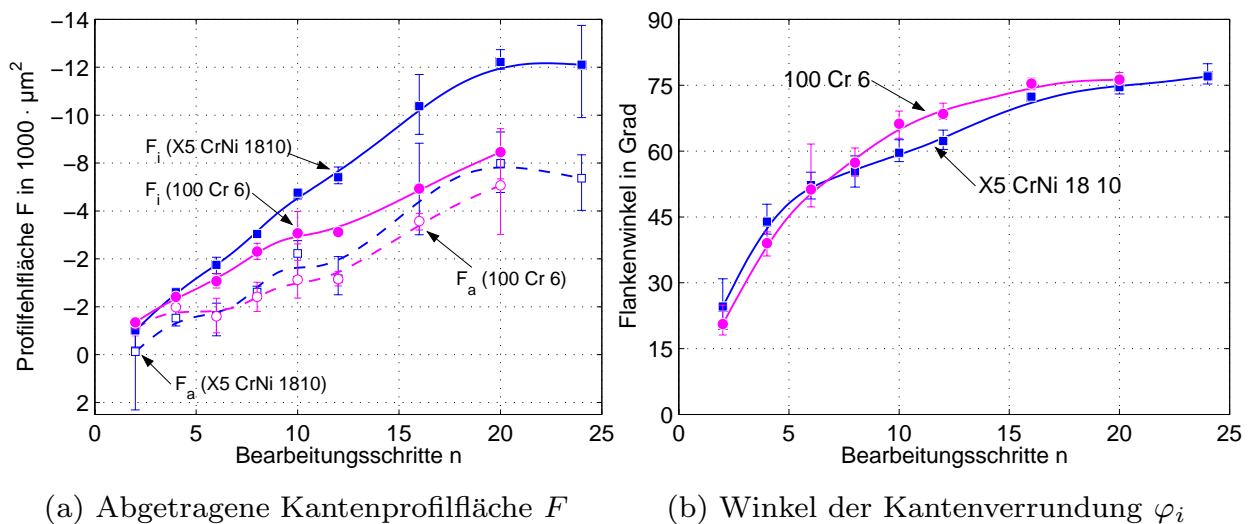


Abb. 6.18: Auswirkung der Bearbeitungsschritte n auf den Kantenabtrag bei pw-Laserstrahlung unter $\alpha=0^\circ$ (Parameter wie in Abb. 6.17)

Kontinuierliche Laserstrahlung geringer Intensität

An den Mikroskopaufnahmen mit kontinuierlicher Laserstrahlung bearbeiteter Kanten in Abbildung 6.19 ist zu erkennen, dass der Grat zunächst umgeschmolzen wird. Beim Werkstoff 100Cr6 zeigen sich bei nur einem Bearbeitungsschritt Schmelztropfen an der Kante. Durch weitere Bearbeitungsschritte ($n=4$ bis 20) bildet sich ein Wulst an der Kante aus, der zunehmend gleichmäßiger wird bis bei $n=100$ Bearbeitungsschritten ein deutlicher Abtrag zu erkennen ist. Die Oberfläche der Kantenverrundung bei $n=100$ ist glatt und wird nur durch vereinzelte Schmelztropfen S beeinträchtigt. Aus der Hitzelinie H ist der zunehmende Wärmeeinfluss im Kantenbereich ersichtlich.

Der Grat A an den Kanten aus X5CrNi1810 kann im ersten Bearbeitungsschritt nicht abgetrennt werden. Der Schmelzwulst B und die Anschmelzun-

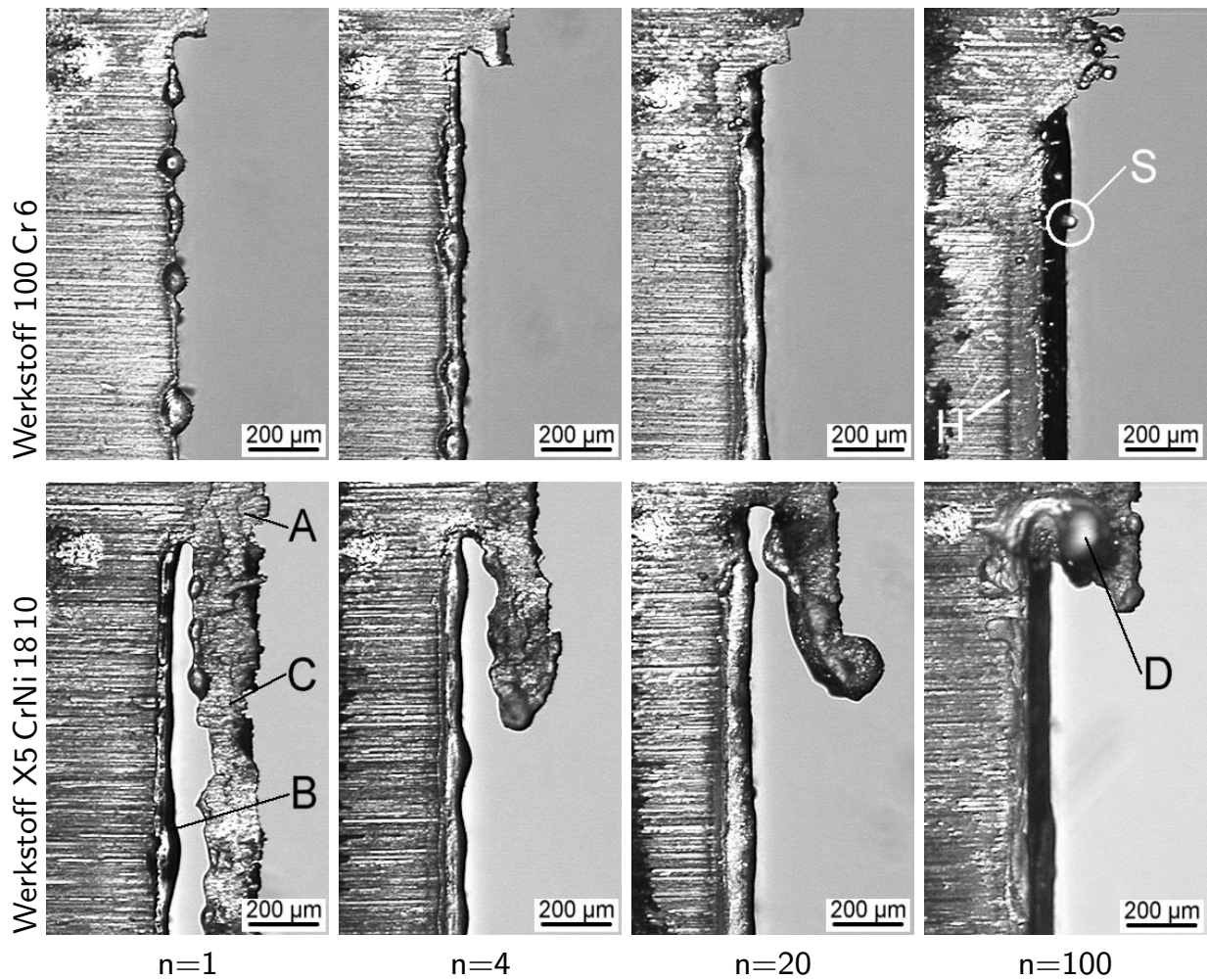


Abb. 6.19: Auswirkung der Bearbeitungsschritte n auf das Entgratergebnis bei cw-Strahlung unter $\alpha=0^\circ$ (Mikroskopaufnahmen unter dem Blickwinkel 0° , Parameter: $I_{m,cw} = 5,8 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$, $v=88,4 \text{ mm/s}$)

gen am verbleibenden Grat C deuten auf ein Durchschmelzen des Grates entlang seiner Breite b hin. Durch weitere Bearbeitungsschritte vergrößert sich der Schmelzwulst B und der Restgrat C verringert sich. Wiederum bei 100 Bearbeitungsschritten ist der Schmelzwulst abgetragen worden, so dass die Kante angefast ist. Am Anfang der Bearbeitungsspur ist ein großer Schmelzaufwurf D zu erkennen, der auf ein Umschmelzen des Restgrates schließen lässt.

Die erzeugten Kanteninnenmaße a_i sind in Abbildung 6.20 über den Bearbeitungsschritten aufgetragen. Positive Werte für die Kantenmaße bedeuten, dass sich Restgrate und Schmelzwülste an der Kante befinden. Ein Abtrag wird ab $n=20$ Bearbeitungsschritte erreicht. Während sich das laterale Kantenmaß a_x offenbar einem Grenzwert nähert, wächst das parallele Kantenmaß a_z zunehmend an. Bei gleicher Streckenenergie lassen sich bei den Kanten aus X5CrNi1810 größere parallele Kantenmaße erzielen als bei 100Cr6.

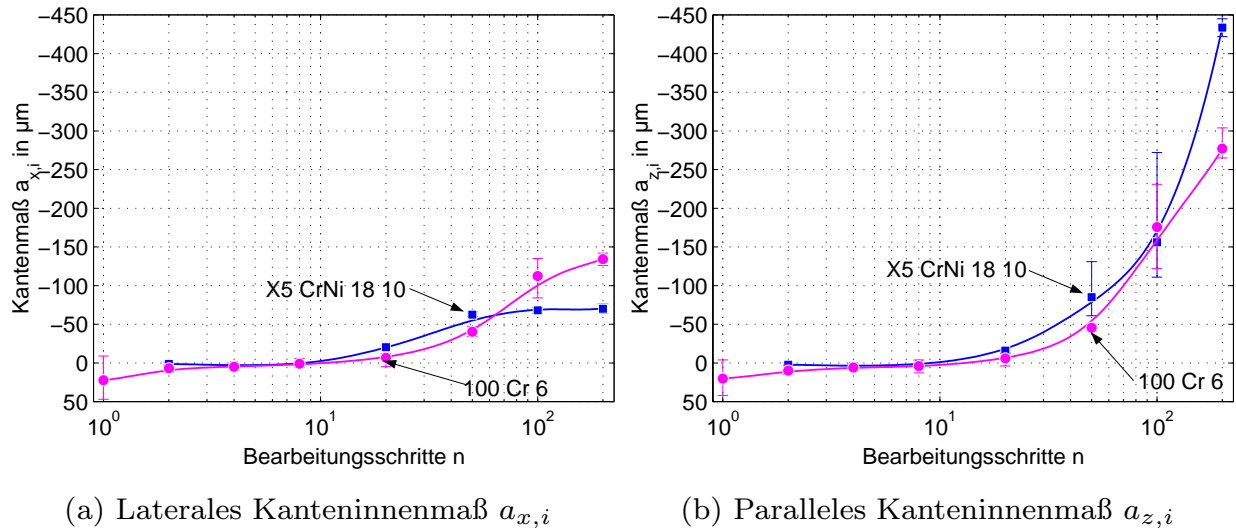


Abb. 6.20: Auswirkung der Bearbeitungsschritte n auf die Kantenmaße bei cw-Laserstrahlung unter $\alpha = 0^\circ$ (Parameter wie in Abb. 6.19)

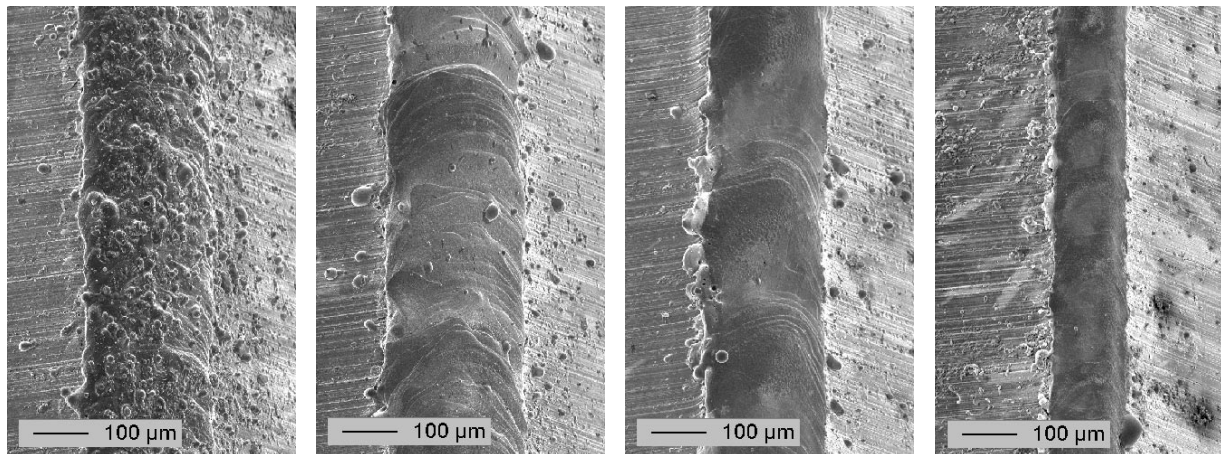
6.4.3.2 Vorschub und Pulsüberlapp

Der Vorschub v , mit dem der Laserstrahl entlang der Kante bewegt wird, wirkt sich auf die Streckenenergie aus. Um eine insgesamt festgelegte Streckenenergie in eine Kante einzubringen, kann ein Bearbeitungsschritt mit langsamem Vorschub oder können viele Bearbeitungsschritte mit schnellem Vorschub gewählt werden. Für das Entgraten mit kontinuierlicher Laserstrahlung wird das Zusammenwirken von Vorschub und Bearbeitungsschritten anhand von Abbildung 6.21 dargestellt.

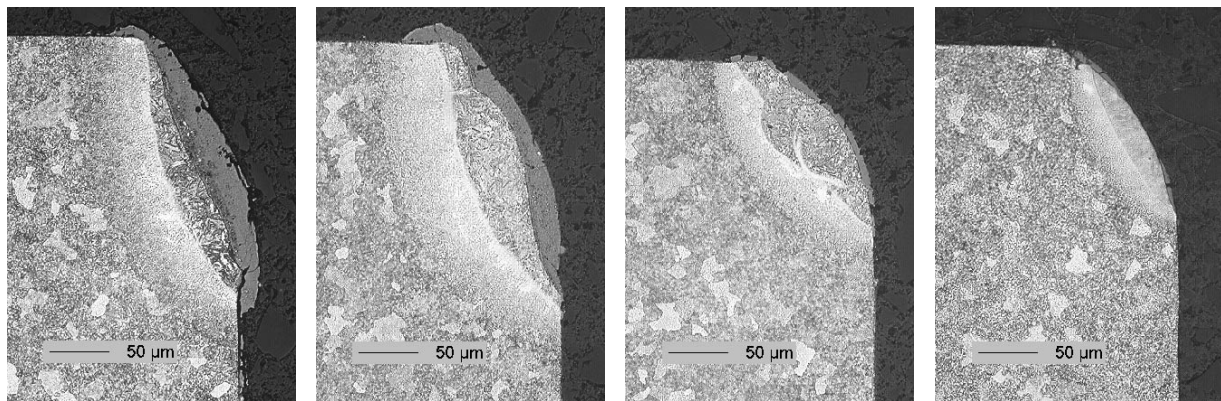
An den Schliffbildern in Abbildung 6.21 ist zu erkennen, dass bei geringem Vorschub die dickste wiedererstartete Schmelzschicht entsteht. Die zugehörige Oberfläche ist aufgrund vieler Schmelzspritzer rau. Mit zunehmendem Vorschub und zunehmenden Bearbeitungsschritten wird die Oberfläche glatter und die Dicke der wiedererstarteten Schmelzschicht verringert sich. Aufgrund des so reduzierten Schmelzvolumens sind beim Vorschub $v=154$ mm/s keine Schmelzaufwürfe mehr erkennbar.

Die Reduzierung der Schmelzaufwürfe geht auch aus Abbildung 6.22a hervor, in der die Kantenprofilflächen über dem Vorschub aufgetragen sind. Die Profilfläche der Aufwürfe, die aus der Differenz $F_i - F_a$ abzuleiten ist, verringert sich ab $v=20$ mm/s. Ebenfalls ab dieser Vorschubgeschwindigkeit steigt der gesamte Abtrag an. Anhand der Breite der äußeren Kantenflanke a_b , dargestellt in Abbildung 6.22b, ist auch wie an den Schliffbildern in Abbildung 6.21 erkennbar, dass bei hohen Vorschüben der Kantenbereich nicht so großflächig aufgeschmolzen wird und sich somit kleinere Kantenmaße ergeben.

REM-Aufnahmen der Kanten unter 45° Blickwinkel



Schliffbilder der Kantenprofile



$v = 1 \text{ mm/s}$
 $n = 1$

$v = 10 \text{ mm/s}$
 $n = 10$

$v = 50 \text{ mm/s}$
 $n = 50$

$v = 154 \text{ mm/s}$
 $n = 154$

Abb. 6.21: Auswirkung des Vorschubs v bei cw-Strahlung konstanter Streckenergie E_s auf die Kantenoberfläche sowie das Kantenprofil und die Wärmeeinflusszone bei Bestrahlung unter $\alpha=0^\circ$ (Parameter: Werkstoff 100 Cr 6, $I_m = 5,8 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$)

Bei gepulster Laserstrahlung wird durch den Fokussdurchmesser d_f , die Pulsrepetitionsrate f_p und den Vorschub v der Überlapp u der einzelnen Pulse festgelegt (siehe Gleichung 3.10). In den Versuchen, deren Ergebnisse in Abbildung 6.23 dargestellt sind, wurde der Vorschub v zwischen 2,75–88 mm/s variiert. Gleichzeitig wurden die Bearbeitungsschritte n erhöht, um die Streckenergie E_s konstant zu halten.

Am Verlauf der abgetragenen Kantenprofilfläche (Diagramm 6.23a) ist ein Abtragminimum im Bereich eines Pulsüberlapps von $u=80\%$ für X5CrNi1810 und für 100Cr6 im Bereich von $u=60\%$ zu erkennen. Ab ungefähr $u=95\%$ steigt der Abtrag schnell an, was auf einen verstärkten Schmelzaustrieb aus der Wirkstelle zurückzuführen ist.

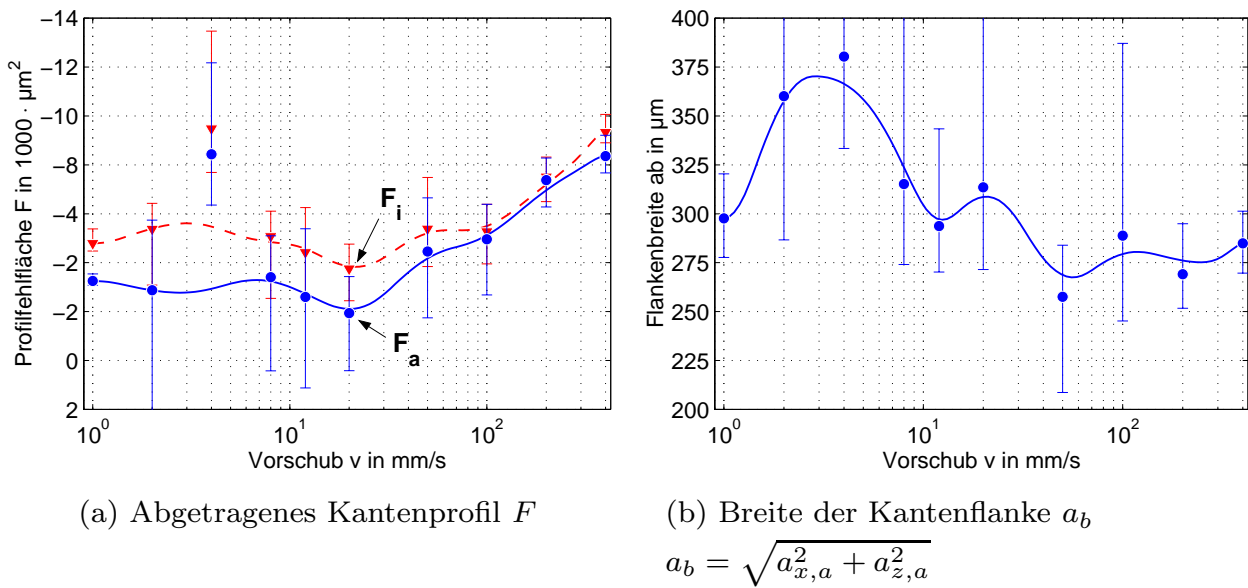


Abb. 6.22: Einfluss des Vorschubs v auf die Kantenverrundung bei cw-Strahlung konstanter Streckenenergie E_s und Einstrahlwinkel $\alpha=0^\circ$.

Die mittlere Rauigkeit R_a , die im Diagramm 6.23b über dem Pulsüberlapp aufgetragen ist, besitzt ein Minimum im Bereich zwischen $90 < u < 95\%$. Die hohe Rauigkeit bei geringem Pulsüberlapp entsteht durch eine wellenförmige Oberfläche, die auch in Abbildung 6.7 erkennbar ist. Durch kleinere Pulsvorschübe verringert sich die so bedingte Rauigkeit. Durch geringere Vorschübe wird verstärkt Schmelze gebildet. Der Austrieb dieser Schmelze verursacht den Anstieg der Rauigkeit im Bereich $u > 90\%$.

6.5 Diskussion der Ergebnisse

Von den untersuchten Prozessparametern wirkt sich die Intensität der Laserstrahlung verbunden mit der Bestrahlungsdauer am stärksten auf den Laserentgratprozess aus:

- Bei gepulster Laserstrahlung hoher Intensität wird Schmelze verdampft, so dass Material aufgrund von Verdampfen und Austreiben der Schmelze durch prozessinduzierten Dampfdruck abgetragen wird. Das beobachtete Abtragmaximum im Bereich von $I_m=1,3 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ ergibt sich durch einen maximalen Schmelzaustrieb.
- Bei niedrigen Intensitäten werden Grat und Kantenbereich zunächst umgeschmolzen, so dass sich Schmelztropfen und -wülste an der Kante bilden. Durch viele Bearbeitungsschritte oder lange Bestrahlungsdauer, die auch durch geringe Vorschübe realisierbar ist, kann sich

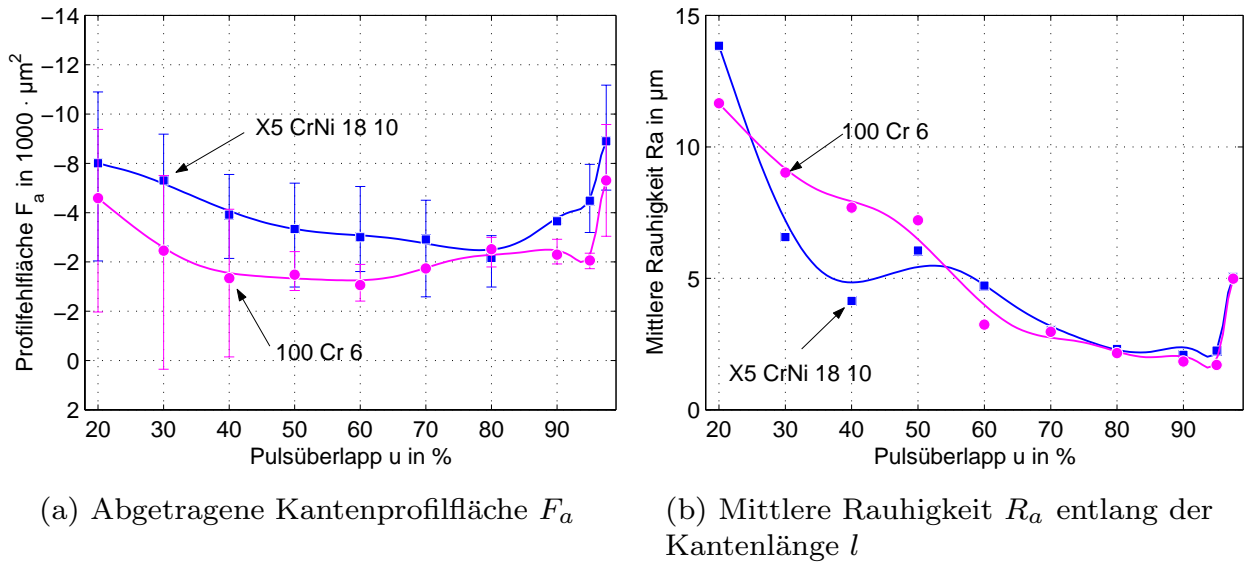


Abb. 6.23: Einfluss des Pulsüberlapps u auf die Kantenverrundung bei konstanter Streckenenergie E_s (Parameter: $\alpha=0^\circ$, $d_f=95 \mu\text{m}$, $I_{m,1 \text{ kHz}} = 1,0 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$)

der Kantenbereich soweit aufheizen, dass die Verdampfungstemperatur überschritten und ebenfalls Material abgetragen wird.

Im Vergleich ist festzustellen, dass sich die resultierende Wärmeeinflusszone bei höheren Intensitäten, die durch kürzere Pulsdauern eingestellt werden, verringert. Gratfreiheit und Stärke der Kantenverrundung hängen neben der Intensität im Wesentlichen von der Streckenenergie ab. Die Gesamt-Streckenenergie kann anhand des Vorschubs und der Bearbeitungsschritte skaliert werden. Bei cw-Strahlung lassen sich durch viele Bearbeitungsschritte mit schnellen Vorschüben höhere Abträge und bessere Oberflächenqualitäten erzielen. Beim Laserentgraten mit gepulster Strahlung gibt es sowohl für den Abtrag als auch für die erzeugte Oberflächenrauigkeit ein Optimum. Je nach eingesetzter Intensität der Laserstrahlung hat der Einstrahlwinkel unterschiedlich große Bedeutung für den Entgratprozess. Während bei hohen Intensitäten die Abtragrichtung in erster Linie durch den Einstrahlwinkel festgelegt wird, spielt bei geringen Intensitäten die Wärmeleitung im Material eine größere Rolle, so dass die Abtragrichtung durch die von der Kanten- sowie Gratgeometrie abhängigen Wärmeleitung und den Einstrahlwinkel festgelegt wird. Zeigt die Abtragrichtung in das Bauteil, besteht die Gefahr der Oberflächenbeschädigung im Kantenbereich. Scharfe Kanten lassen sich durch Abtrennen der Gratfahnen bei Einstrahlwinkeln größer 135° erzielen.

Der Einfluss des Strahlüberlapps auf den Entgratprozess hängt insbesondere vom Einstrahlwinkel ab. Bei Einstrahlwinkeln im Bereich von 45° ist der

Kantenabtrag unabhängig von der Strahlposition zur Kante. Bei Einstrahlwinkeln von 0° bzw. 90° dagegen, die schwerpunktmäßig beim Entgraten von Bohrungen eingesetzt werden, hängt die Kantenverrundung stark vom Strahlüberlapp ab. In Abbildung 6.24 ist das Zusammenwirken der Parameter Einstrahlwinkel und Strahlüberlapp im Hinblick auf das Entgratergebnis schematisch skizziert.

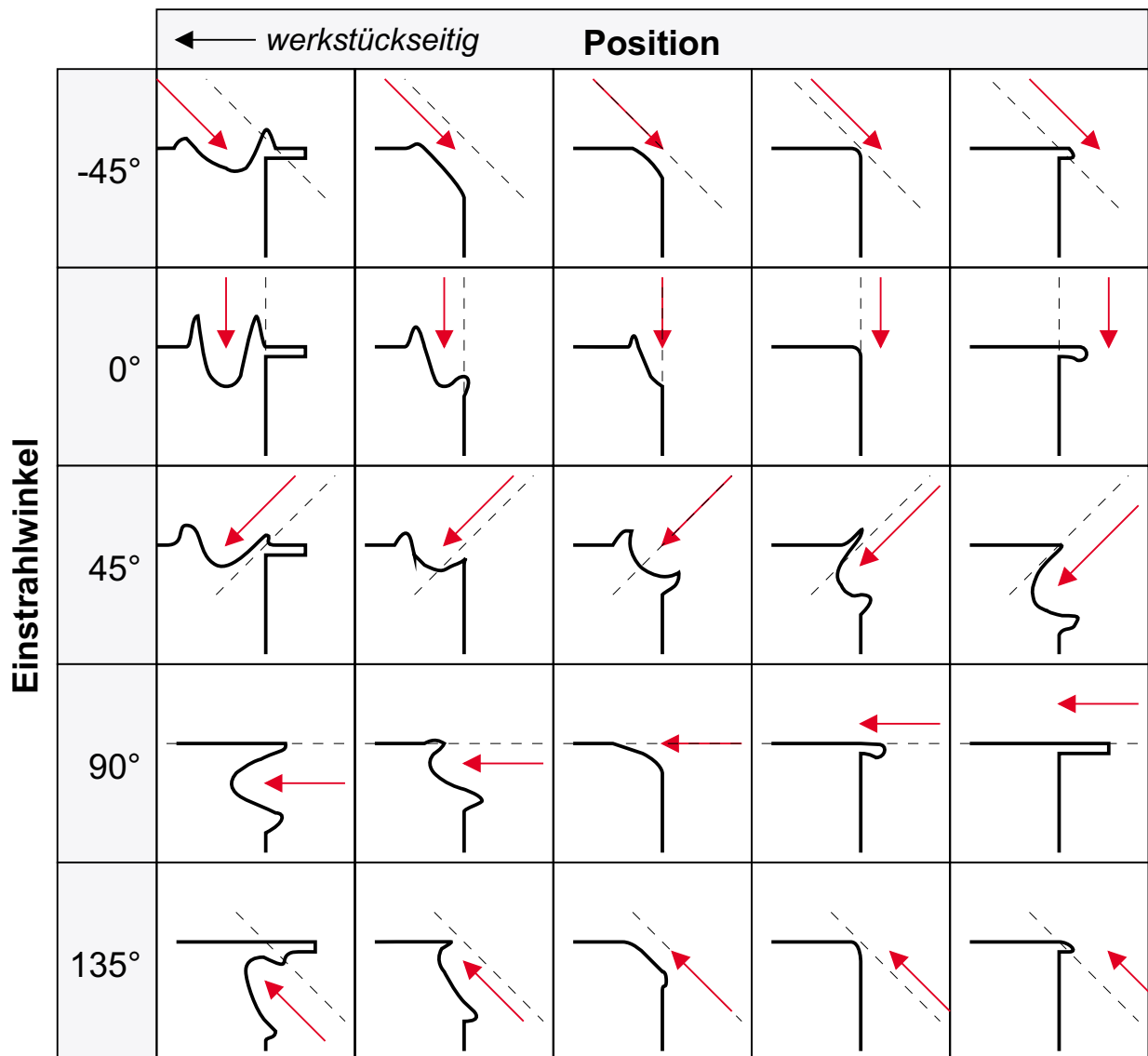


Abb. 6.24: Auswirkung der Kombination von Einstrahlwinkel und Strahlüberlapp auf das Entgratergebnis beim Laserentgraten mit Materialabtrag

Kapitel 7

Ansätze einer Prozessmodellierung

Zum Laserentgraten wird im folgenden Abschnitt ein vereinfachtes Prozessmodell skizziert. Da das in Abschnitt 3 erläuterte Laserabtragen die Basis des Laserentgratens bildet, wird auf diese Grundlagen zurückgegriffen. Das Modell soll den Entgratprozess qualitativ und in seinen Phänomenen beschreiben und liefert so einen Beitrag zum Prozessverständnis. Damit bildet es eine Grundlage, Laserentgratprozesse hinsichtlich des Parametereinflusses zu beschreiben, Fehlermöglichkeiten zu erkennen und letztendlich eine Prozesssicherung entwerfen zu können.

7.1 Phasenaufteilung des Laserentgratens

Bei der Kantenbearbeitung sind zwei grundlegende Fälle zu unterscheiden: gratbehaftete Kanten und gratfreie Kanten. Die Bearbeitung von gratfreien Kanten soll als Kantenformen bezeichnet werden. Entgraten bedeutet primär das Entfernen des Grates aber im zweiten Schritt, wenn der Grat entfernt ist und die Laserbestrahlung anhält, auch die Kantenformung. So soll der Laserentgratprozess insgesamt in vier Phasen aufgeteilt werden, die mit den jeweils maßgeblichen Phänomenen in Abbildung 7.1 skizziert sind.

Aufheizen des Kantenbereichs: Das Verhältnis von absorbierter Energie und aus der Wirkstelle durch die Wärmeleitung abgeleiteter Energie bestimmt die Geschwindigkeit des Aufheizens. Chemische Reaktionen wirken sich auf den Absorptionsgrad aus. Freigesetzte Energie

aus exothermen Reaktionen beschleunigt das Aufheizen. An der Kante anhaftender Grat beeinflusst die Menge absorbierter Energie.

Gratentfernung: Die Schmelztemperatur und gegebenenfalls die Verdampfungstemperatur werden überschritten, so dass der Grat umschmilzt oder abgetragen wird. Beim Abdampfen entsteht ein Dampfdruck, der auf die Wirkstelle und den Grat wirkt, sowie ein Metaldampf oberhalb der Wirkstelle.

Kantenformung: Die Kantenform ändert sich aufgrund von Schmelzfluss und -austrieb sowie Verdampfen, wobei auch Seitenaufwürfe entstehen können. Aufgrund der sich ändernden Kantenform wird die absorbierte Intensität beeinflusst. Durch die vermehrte Bildung von Materialdampf kann die Wirkstelle abgeschirmt werden.

Erstarrung des Kantenbereichs: Nach dem Ende der Laserbestrahlung kühlt die Wirkstelle auf Umgebungstemperatur ab und die vorhandene Schmelze erstarrt. Das resultierende Gefüge und die Größe der Wärmeeinflusszone hängen insbesondere vom Material und der Menge der insgesamt eingebrachten Energie ab.

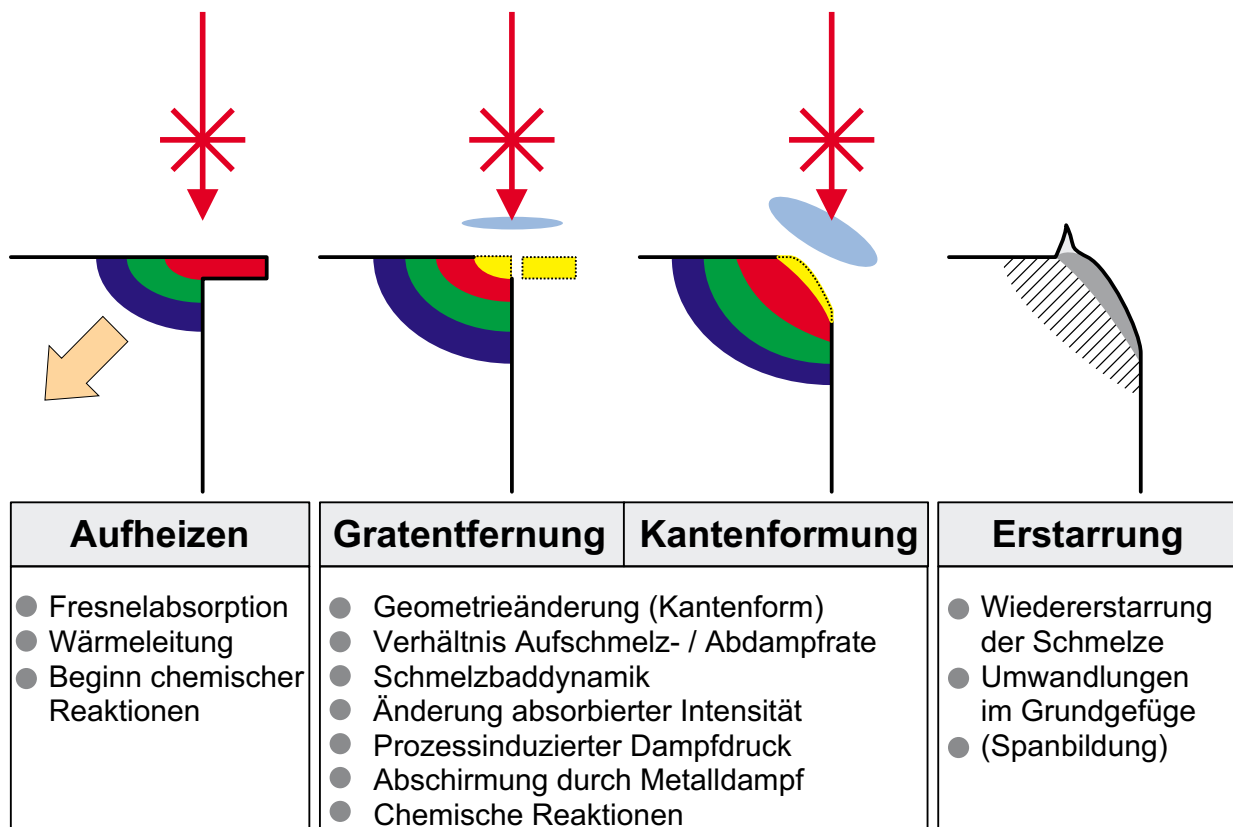


Abb. 7.1: Aufteilung des Laserentgrats in vier Prozessphasen

7.2 Aufheizen des Kantenbereichs

7.2.1 Wärmeleitung an einer Kante ohne Grat

Bezüglich der Wärmeleitung an einer Kante sind zwei Fälle zu unterscheiden, die in Abbildung 7.2 skizziert sind. Im Fall der senkrechten Einstrahlung ($\alpha = 0^\circ$) hat Carslaw [25] gezeigt, dass das mit den Gleichungen 3.8 und 3.9 (Abschnitt 3.2.2) formulierte Wärmeleitungsproblem vorliegt. Für den Fall, dass an beiden Seiten der Kante Intensität absorbiert wird, bedarf es dagegen einer komplexeren Betrachtungsweise. In der Literatur lassen sich dazu keine analytischen Ansätze finden, so dass hier auf die Finite-Element-Methode zurückgegriffen werden soll.

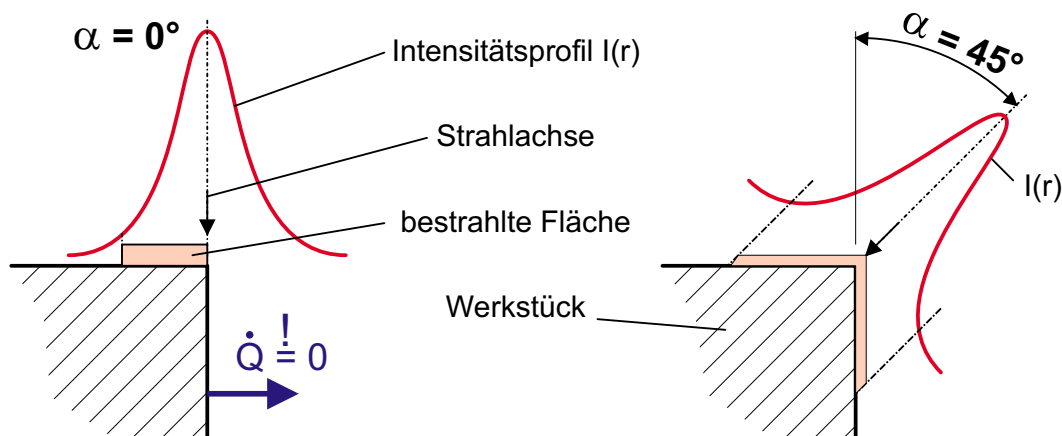


Abb. 7.2: Ein- und zweiseitige Laserbestrahlung einer Kante

Das Ergebnis einer Finite-Element-Berechnung zur Variation des Einstrahlwinkels ist in Abbildung 7.3 für eine Bestrahlungsdauer von $t = 5 \cdot 10^{-4}$ s dargestellt. Der Berechnung liegt ein zweidimensionales FEM-Modell zugrunde, wobei die Temperaturabhängigkeit der Materialkenngrößen nicht berücksichtigt wurde. Zwar beinhalten so die Absolutwerte der berechneten Temperaturen nur eine geringe Aussagekraft, dennoch kann qualitativ ausgesagt werden, dass bei einer Bestrahlung unter dem Einstrahlwinkel von $\alpha = 0^\circ$ trotz maximal beaufschlagter Intensität geringere Temperaturen als bei der Bestrahlung unter $\alpha > 0^\circ$ erreicht werden. Es zeigt sich, dass das Temperaturmaximum bei $\alpha = 45^\circ$ erreicht wird.

Abbildung 7.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Wärmeausbreitung an einer Kante unter der Bestrahlung von $\alpha = 45^\circ$. Bei kurzen Bestrahlungsdauern im Nanosekundenbereich ($t = 2 \cdot 10^{-7}$ s) ergeben sich nur geringe Wärmeeindringtiefen pro Puls. Bei längeren Pulsdauern ist deutlich zu erkennen, wie sich die Wärme hauptsächlich zur Werkstückmitte (Richtung links unten) hin ausbreitet. Die von den Seitenflächen ausgehenden Wärmewellen treffen an der Diagonalen zwischen den senkrecht zueinander stehenden Seiten-

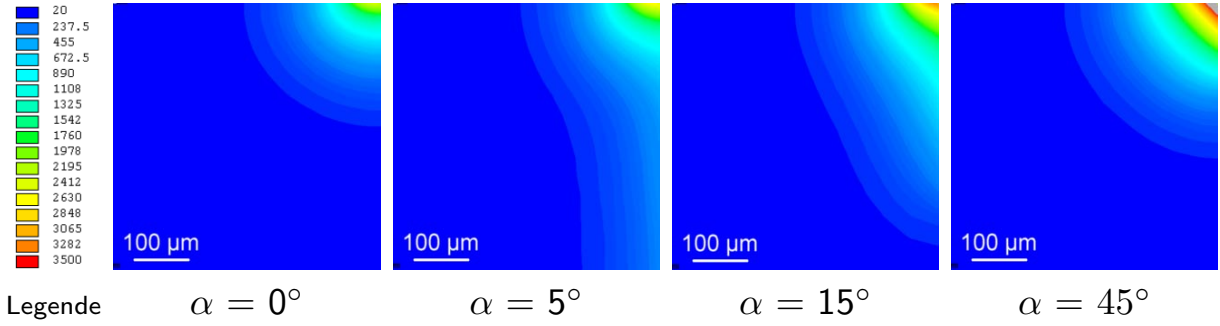


Abb. 7.3: Auswirkung des Einstrahlwinkels α auf die Temperaturverteilung an einer Kante (Parameter der FEM-Simulation: $I_0=5 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$, $t=5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$, $d_f=200 \mu\text{m}$, Material St 37)

flächen aufeinander. Aufgrund dessen breitet sich die Wärme entlang der Diagonalen am schnellsten aus. An der Kante entsteht ein Wärmestau, der dort das Temperaturmaximum bewirkt.

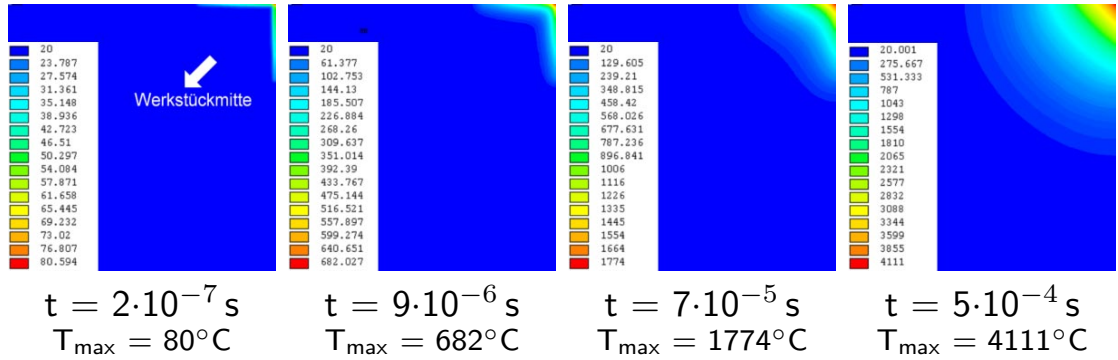


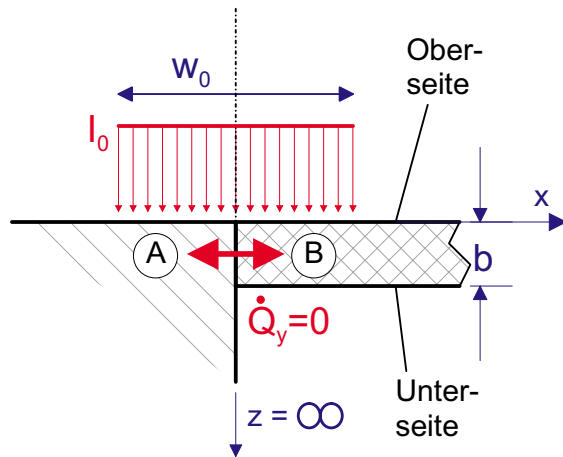
Abb. 7.4: FEM-Simulation der zeitlichen Entwicklung der Temperaturverteilung an einer Kante (Parameter: $\alpha=45^\circ$, $I_0=5 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$, $d_f=200 \mu\text{m}$, Material St 37)

7.2.2 Wärmeleitung gratbehafteter Kanten

Im einfachsten Modellierungsfall, dargestellt in Abbildung 7.5a, soll der Grat B gegenüber dem Werkstück A zunächst als dünnes Blech betrachtet und der Wärmefluss \dot{Q} zwischen Grat und Werkstück zu Null angenommen werden. Mit der von Brugger postulierten Gleichung 7.1 (in [24] beschrieben) kann die Temperatur T eines Bleches B in der Strahlachse abgeschätzt werden:

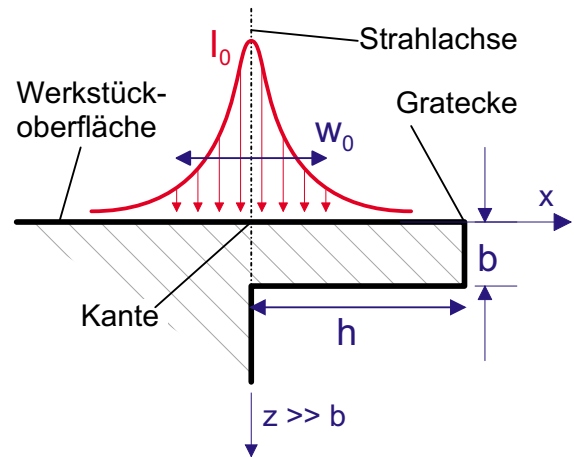
$$T(z, t) = \frac{A I_0}{\lambda} \sqrt{\kappa t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\text{ierfc} \frac{|z - 2nb|}{2\sqrt{\kappa t}} - \text{ierfc} \frac{\sqrt{(z - 2nb)^2 + w_0^2}}{2\sqrt{\kappa t}} \right) \quad (7.1)$$

wobei von einem Laserstrahl des Durchmessers $2 \cdot w_0$ und konstantem Intensitätsprofil der Höhe I_0 sowie einem unendlich ausgedehnten Blech der Dicke b ausgegangen wird. In Abbildung 7.6b sind berechnete Temperaturen in



(a) Analytisches Modell

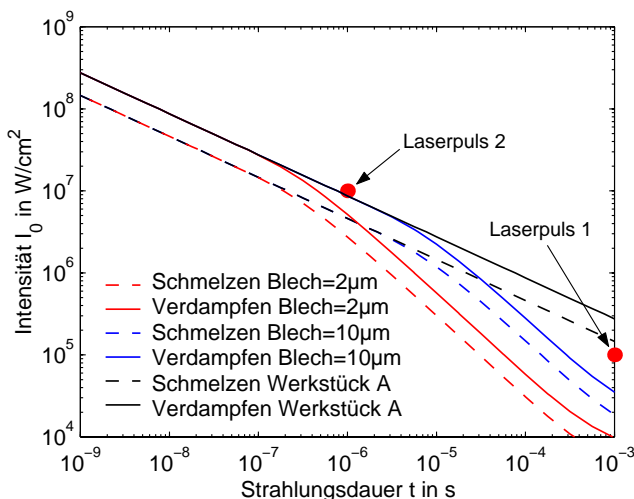
Annahme des Grates als dünnes Blech B ; kein Wärmefluss zwischen Grat und Werkstück A



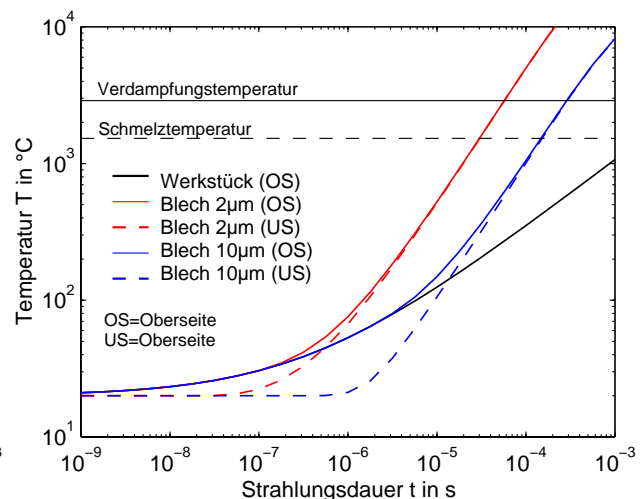
(b) 2D-FEM-Modell

Grat der Dicke b und Höhe h . Bestrahlung mit gaussförmigem Strahlprofil.

Abb. 7.5: Modelle zur Berechnung der Wärmeleitung gratbehafteter Kanten



(a) Zustand der Oberfläche in der Strahlachse

(b) Temperaturverlauf bei Intensität $1 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$.

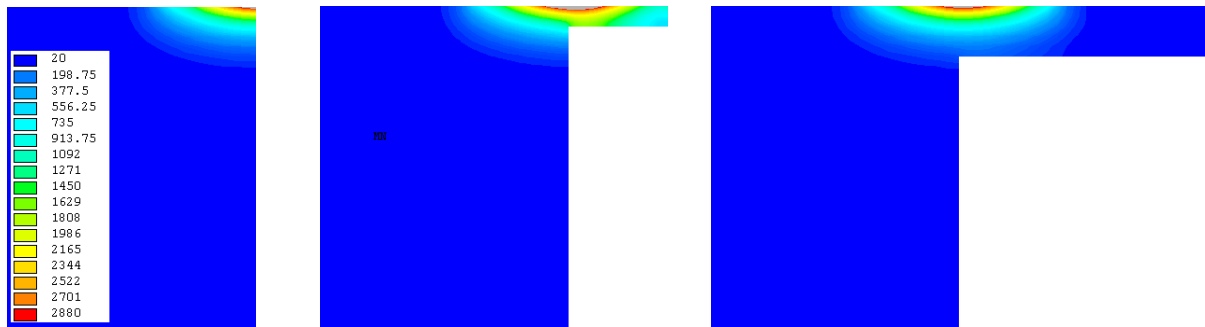
(Laserpuls 1 in Diagramm 7.6a)

Abb. 7.6: Einfluss der Materialdicke auf die Wärmeleitung. Berechnungsgrundlage: Gl. 3.6 und Gl. 7.1. (Parameter: Materialkennwerte für St 37; Fokussdurchmesser $2 \cdot w_0 = 400 \mu\text{m}$)

der Strahlachse für dünne Bleche B nach Gleichung 7.1 und einen massiven Körper A nach Gleichung 3.6 gegenübergestellt. Das linke Diagramm 7.6a zeigt die erforderliche Intensität, um bei vorgegebener Bestrahlungsdauer Schmelz- bzw. Verdampfungstemperatur auf der Oberfläche zu erreichen. Je dicker der Grat ist, desto geringer muss die Intensität und die Bestrahlungsdauer länger gewählt werden, um den Grat zu verdampfen aber die Werkstückoberfläche noch nicht aufzuschmelzen. Um diesen Effekt zu erzie-

(a) **Geringe Intensität** (Laserpuls 1)

$I_0=1 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$, Bestrahlungsdauer $t=10^{-3} \text{ s}$, Fokusbereich $d_f=400 \mu\text{m}$

(b) **Hohe Intensität** (Laserpuls 2)

$I_0=1 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$, Bestrahlungsdauer $t=10^{-6} \text{ s}$, Fokusbereich $d_f=40 \mu\text{m}$

Abb. 7.7: Berechnete Temperaturprofile für unterschiedliche Gratabmessungen und Pulsintensitäten (Gratabmessungen: $20 \times 4 \mu\text{m}$ für Fein-
grat und $50 \times 10 \mu\text{m}$ für Massivgrat)

len, kann für den Bereich von Grattedicken von 2 bis $10 \mu\text{m}$ maximal eine Intensität von ungefähr $2 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$ bei Bestrahlungsdauern bis $t = 10^{-3} \text{ s}$ eingesetzt werden.

Für den in Abbildung 7.6a eingezeichneten Fall der Bestrahlung mit einer Intensität von $I_0 = 1 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$ (Laserpuls 1) sind in der Abbildung 7.6b berechnete Temperaturen über der Bestrahlungsdauer aufgetragen. Für die betrachteten Grate B mit Dicken im Bereich von 2 und $10 \mu\text{m}$ ist ersichtlich, dass die Temperaturdifferenz zwischen der Ober- und Unterseite bei Erreichen der Schmelztemperatur sehr gering ist. So scheint der Grat als Ganzes fast gleichzeitig aufzuschmelzen.

Gegenüber der vereinfachten Modellvorstellung fließt in der Realität Wärme aus dem Grat in das massive Werkstück ab. Dieser Effekt soll anhand des in Abbildung 7.5b skizzierten FEM-Modells analysiert werden. Der Laserstrahl trifft senkrecht auf den Grat, wobei die Strahlachse auf die Kante des Werkstücks positioniert wird. Im Unterschied zum analytischen Rechenmodell kann eine gaussförmige Intensitätsverteilung des Laserstrahls berücksichtigt werden. Um den Einfluss der Grattedimensionen zu berücksichtigen, wird zwischen Fein- und Massivgrat unterschieden. In Abbildung

7.6a sind die zwei Arbeitspunkte eingezeichnet, für die berechnete Temperaturprofile für Kanten mit und ohne Grat in Abbildung 7.7 gegenübergestellt sind.

Deutlich erkennbar ist, dass bei Laserstrahlung mit geringer Intensität (Laserpuls 1: $I_0=10^5 \text{ W/cm}^2$) die Gratgeometrie einen großen Einfluss auf die Wärmeleitung hat, während die Gratgeometrie bei hohen Intensitäten (Laserpuls 2: $I_0=10^7 \text{ W/cm}^2$) nahezu keine Rolle spielt. Bei geringen Intensitäten werden durch einen vorhandenen Grat höhere Temperaturen am Übergang vom Grat zum Werkstück erreicht. Der Bereich, in dem ein Verdampfen des Grates ohne Aufschmelzen der Werkstückoberfläche möglich ist, ist somit kleiner als der in Abbildung 7.6a eingegrenzte Bereich.

Zur Beurteilung des Aufheizvorgangs sind die Temperaturen in der Strahlachse und an der Gratecke in Abbildung 7.8 über der Bestrahlungsdauer aufgetragen. Zu Beginn der Bestrahlung ($t < 10^{-8} \text{ s}$) befindet sich das lokale Temperaturmaximum unabhängig von der Höhe der Intensität zunächst in der Strahlachse auf der Gratoberfläche. Wird im weiteren Prozessverlauf die Wärmeausbreitung an den Gratgrenzen behindert, entsteht an der Gratecke ein Wärmestau. Dadurch wandert das lokale Temperaturmaximum zur Gratecke. Dieser Effekt zeigt sich in Abbildung 7.8a. Bei hoher Intensität, dargestellt in Abbildung 7.8b, ist erkennbar, dass sich für die betrachteten Gratabmessungen die Maximaltemperatur stets in der Strahlachse befindet. Im Extremfall des Massivgrates bleibt die Temperatur an der Gratecke aufgrund der zum Fokussdurchmesser langen Grathöhe sogar konstant.

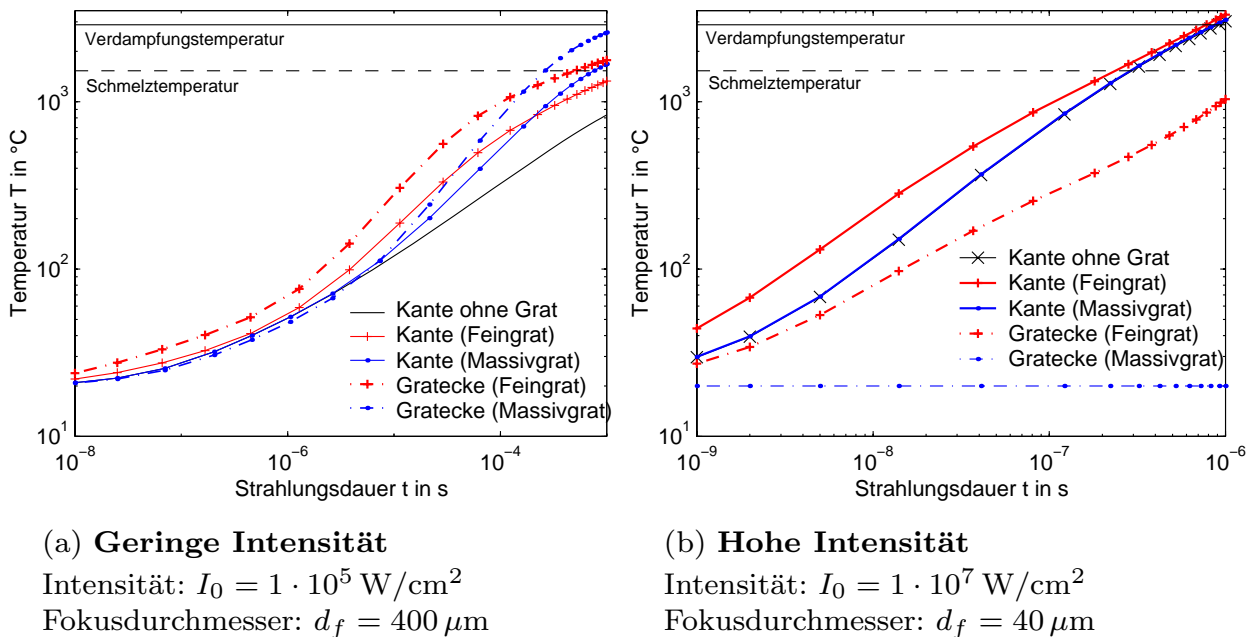


Abb. 7.8: Berechnete Temperaturen in der Strahlachse und an der Gratecke über der Bestrahlungsdauer. Gratabmessungen: $20 \times 4 \mu\text{m}$ für Feingrat und $50 \times 10 \mu\text{m}$ für Massivgrat.

Inwieweit die Wärmeleitung von der Gratgröße beeinflusst wird, hängt vom Größenverhältnis zwischen Wärmeeinflusszone und Gratvolumen ab. Denn ist die Wärmeausbreitung durch die Gratränder behindert, entsteht ein Wärmestau. Dies führt dazu, dass zum einen der Grat an sich heißer und zum zweiten Wärme über die Anbindung des Grates an das Werkstück abgeleitet wird. Dieser Sachverhalt zeigt sich an den in Abbildung 7.9 dargestellten Ergebnissen, die anhand des zuvor erläuterten FEM-Modells berechnet wurden. Bei konstantem Strahlradius wurde die Gratquerschnittsfläche

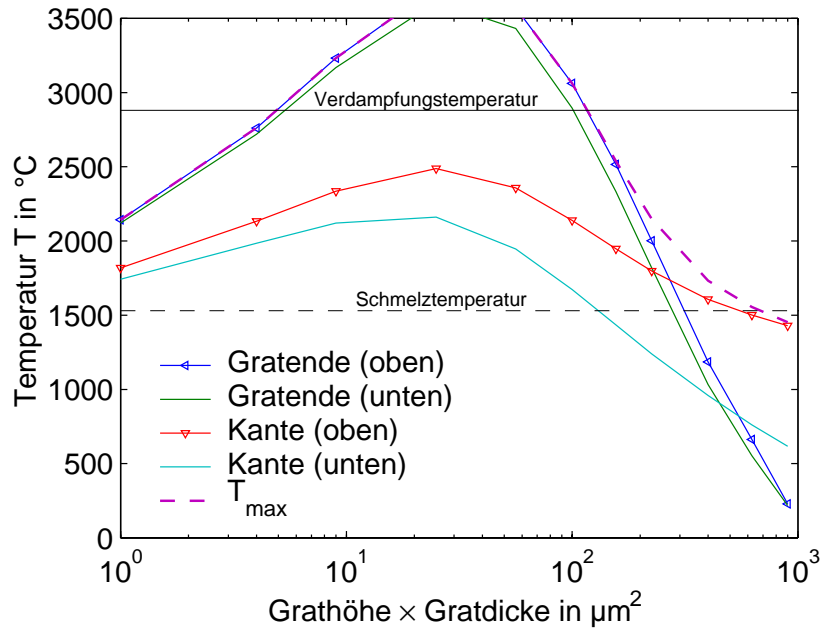


Abb. 7.9: Berechnete Temperaturen in Abhängigkeit der Gratquerschnittsfläche – bei konstanten Verhältnis zwischen Grathöhe und -dicke (Modellierungsparameter: Intensität $I_0=1 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$, Bestrahlungsdauer $t=2 \cdot 10^{-5} \text{ s}$, Fokusbereich $d_f=100 \mu\text{m}$, Verhältnis $h/b = 4$)

bei gleichbleibendem Verhältnis zwischen Grathöhe h und Graddicke b variiert. Mit steigender Grathöhe wird mehr Energie vom Grat absorbiert, so dass trotz ebenfalls wachsender Graddicke zunächst ein zunehmender Wärmeüberschuss im Grat entsteht. Bei einer weiteren Steigerung der Gratquerschnittsfläche nimmt der Wärmeüberschuss ab. Die Temperaturen an der Kante (Verbindung zwischen Werkstück und Grat) streben dann für eine unendlich große Gratquerschnittsfläche gegen die Werte, die an einer Kante ohne Grat entstehen.

Die beiden Graddimensionen Dicke b und Höhe h wirken sich unterschiedlich auf die Wärmeleitung aus. Die Graddicke nimmt für den dargestellten Fall insbesondere Einfluss auf die Wärmeleitung senkrecht zur Oberfläche. Ist der Grat sehr dünn, heizt sich die Oberfläche schneller auf, so dass sich höhere Temperaturen ergeben. Die in Abbildung 7.10a dargestellten Ergebnisse zei-

gen diesen Sachverhalt. Die Auswirkung unterschiedlicher Grathöhen auf die erreichten Temperaturen ist in Abbildung 7.10b dargestellt. Grate, die im Verhältnis zum Fokusradius lang sind, schmelzen an ihren Rändern nicht auf. Das lokale Temperaturmaximum auf der Gratoberfläche liegt dann zwischen dem Gratrand und der Kante. Werden die Grate kürzer, wandert das lokale Temperaturmaximum bis auf die oberere Gratecke. Bei zunehmend kleineren Grathöhen wird im Verhältnis zur Gratquerschnittsfläche weniger Energie vom Grat absorbiert, so dass sich letztendlich Verhältnisse wie ohne einen anhaftenden Grat ergeben.

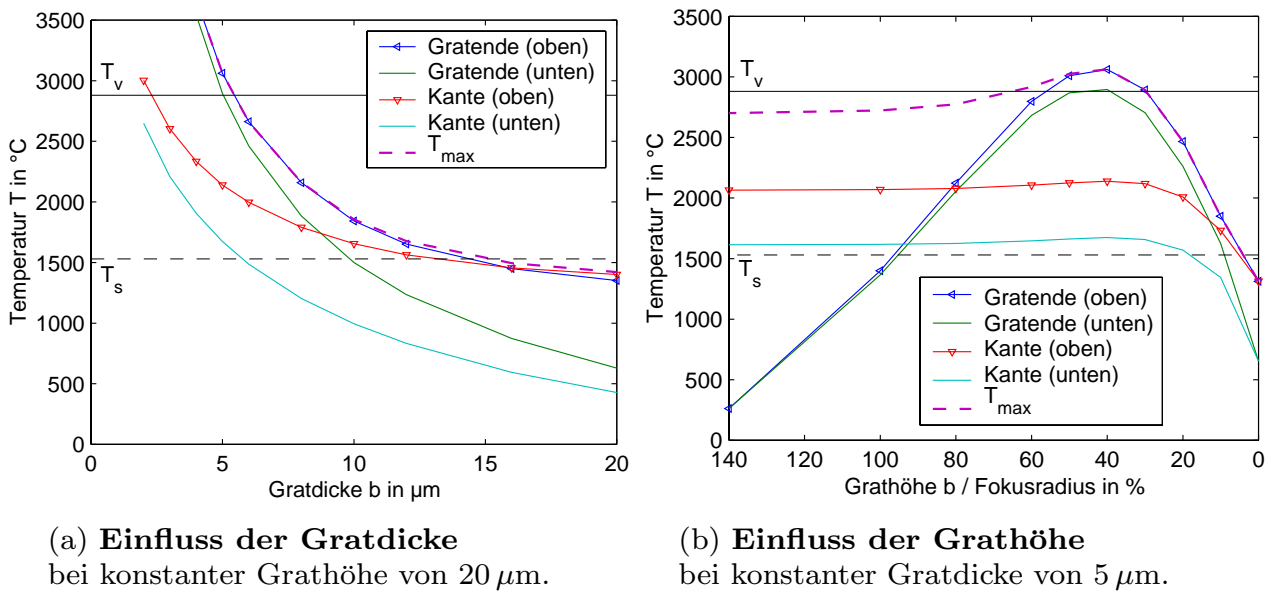


Abb. 7.10: Berechnete Temperaturen in Abhängigkeit der Gratdimensionen (Modellierungsparameter: Intensität $I_0=1 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$, Bestrahlungsdauer $t=2 \cdot 10^{-5} \text{ s}$, Fokusradius $d_f=100 \mu\text{m}$)

7.2.3 Zusammenfassung

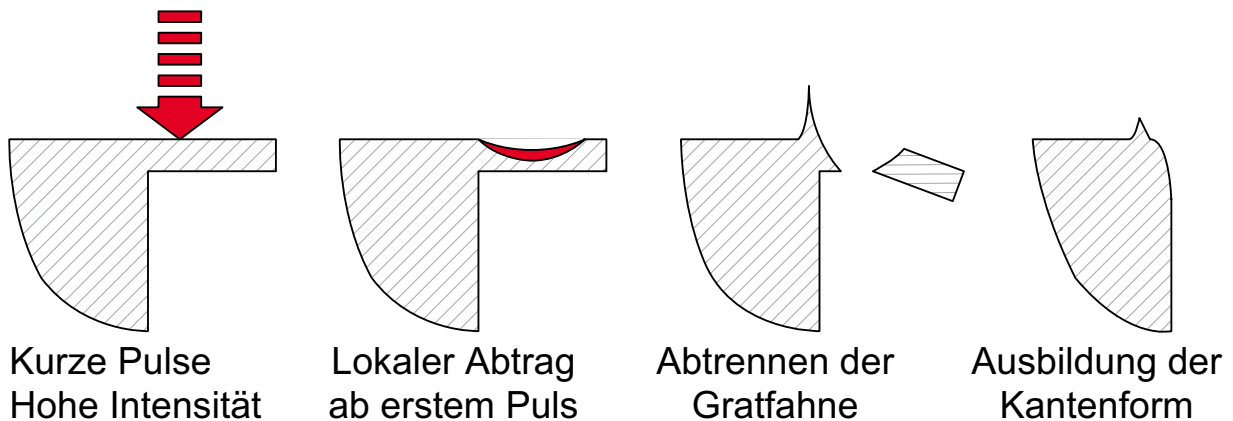
Die Ergebnisse, die sowohl anhand des analytischen als auch des komplexeren FEM-Modell berechnet wurden, bringen:

- einmal die naheliegende Aussage, dass bei kleiner Wärmeeinflusszone gegenüber den Gratabmessungen die Wärmeleitung im Grat so wie die Wärmeleitung im Massivmaterial betrachtet werden kann. Eine erste Abschätzung dazu kann anhand des Diagramms 7.6a getroffen werden.
- Beim Einsatz von Kurzpulslasersystemen mit hohen Intensitäten in Verbindung mit Gratdicken im Bereich von $2 \mu\text{m}$ kann die Auswirkung der Gratgeometrie auf die Wärmeleitung vernachlässigt werden.

7.3 Gratentfernung

Je nach eingesetzter Intensität wird der Grat komplett aufgeschmolzen oder nur partiell abgetragen. In Abbildung 7.11 sind die Unterschiede des Laserentgratens mit hoher und geringer Intensität gegenübergestellt. Diese beiden Fälle stellen Extreme dar, denn die Intensität kann stufenlos variiert werden, so dass die Aufteilung zwischen Umschmelz- und Abtraganteilen des Gratvolumens fließend ist.

Sublimationsbasierter Feinschnitt



Umschmelzbasiertes Entgraten

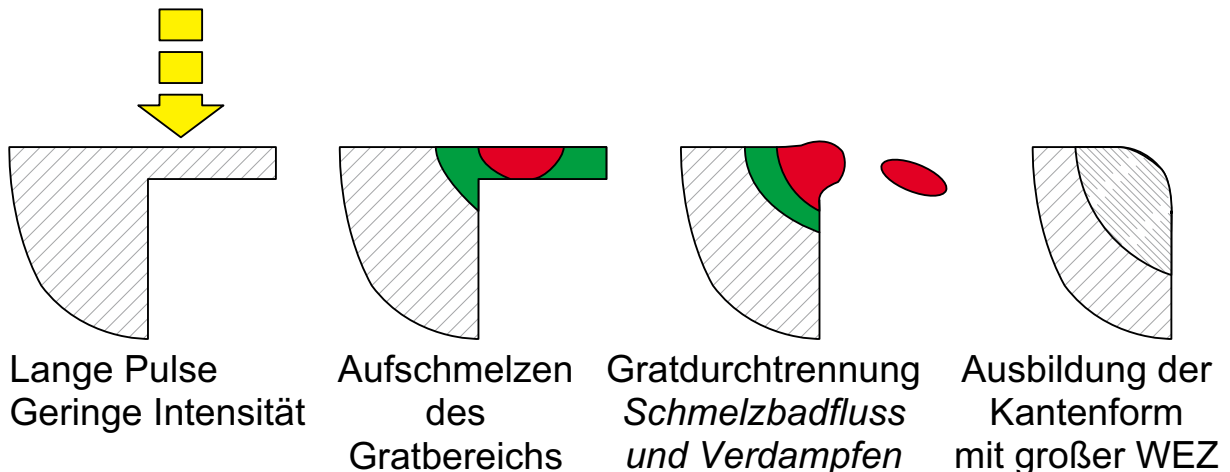


Abb. 7.11: Prozessunterschiede beim Laserentgraten durch geringe und hohe Intensität

Beim Entgraten mit hohen Intensitäten wird schon mit dem ersten Puls das Material in der Wirkstelle auf Verdampfungstemperatur erhitzt, so dass ein lokaler Abtrag entsteht. Aufgrund der hohen Intensität bildet sich nur eine dünne Schmelzschicht aus. Der prozessinduzierte Dampfdruck treibt Teile der Schmelze mit hoher Geschwindigkeit aus, so dass sich auf der anliegenden Oberfläche Aufwürfe bilden.

Bei geringen Intensitäten und damit verbundenen längeren Bestrahlungsdauern spielt die Gratgeometrie wegen der Wärmeleitung eine wichtige Rolle. In diesem Fall ist es prinzipiell möglich, Teile des Grates auf Verdampfungstemperatur zu erhitzen, während die Oberflächentemperatur des Werkstücks noch unterhalb der Schmelztemperatur liegt. Doch die Berechnungen aus Abschnitt 7.2.2 zeigen, dass zunächst der gesamte Grat aufgeschmolzen wird. Der schmelzförmige Grat verliert seine mechanische Stabilität, so dass sich das Schmelzvolumen des Grates aufgrund der Oberflächenspannungskräfte tropfenförmig zusammenzieht. Dieser Schmelztropfen kann sich unter der Wirkung äußerer Kräfte (durch Gravitation oder Verdampfungsdruck verursacht) von der Kante ablösen. Ein an der Kante anhaftender Tropfen gibt im Verhältnis zu einem dünnen Grat mehr Wärme an das Werkstück ab. Außerdem absorbiert er aufgrund der reduzierten Oberfläche weniger Energie, so dass ein selektives Verdampfen des Tropfens gegenüber dem Werkstück erheblich erschwert wird. Die modellhafte Vorstellung, dass nur der Grat verdampft, während die anliegenden Oberflächen des Werkstücks nicht aufschmelzen, erscheint somit nicht realisierbar.

Die Gratabmessungen hinsichtlich Gratdicke und Grathöhe variieren im allgemeinen entlang einer Werkstückkante. Wird eine Laserstrahlung geringer Intensität eingesetzt, werden entlang der Werkstückkante aufgrund der sich ändernden Wärmeleitungsverhältnisse unterschiedlich hohe Temperaturen im Grat erreicht. Grate, deren Grathöhe im Verhältnis zum Fokusbereich in einem mittleren Bereich (beispielsweise um 40 %) liegt, können an der Gratecke die Verdampfungstemperatur überschreiten, während die übrigen Grate maximal aufgeschmolzen werden. Die Gleichmäßigkeit entgrateter Kanten hängt bei geringen Intensitäten also von der Gleichmäßigkeit des Grates ab. Um höchste Präzision hinsichtlich der Gleichmäßigkeit entgrateter Kanten zu erzielen, eignen sich hohe Intensitäten besser. Denn dann hat die Gratgeometrie keinen so großen Einfluss mehr auf die Wärmeleitung.

7.4 Ausbildung der Kantenform

7.4.1 Mikroabtrag des Kantenbereichs

Die wesentlichen Wirkmechanismen, die beim Laserabtragen und -bohren auftreten (Abschnitt 3.2.3), können auch für das Entwickeln eines Prozessverständnisses beim Laserentgraten herangezogen werden. So stellen das Verdampfen von Schmelze und der Schmelzaustrieb die Kernphänomene des Kantenformungsprozesses dar und ihr Zusammenwirken charakterisiert den Mikroabtragprozess. Die wesentlichen Zusammenhänge hinsichtlich des Materialabtrags an der Kante sind in Abbildung 7.12 skizziert. Während die Ab-

Laserstrahlenergie. Die Dichte und die Ausdehnung der Metaldampfwolke bestimmt den Anteil der so abgeschirmten Laserstrahlung. Die Abschirmung durch Metaldampf ist dem Prozessablauf während eines einzelnen Pulses zuzuordnen und begrenzt so die wirtschaftlich einsetzbare Intensität.

Geometrie der absorbierenden Oberfläche: Aufgrund des Materialabtrags ändert sich die Kantenform, so dass in jedem Punkt der Kantenkontur auch der Einfallswinkel für die Laserstrahlung verändert wird. Primär bewirkt dies eine Vergrößerung der bestrahlten Fläche, so dass die beaufschlagte Intensität (siehe Abb. 7.13) reduziert wird. Außerdem ändert sich auch der Anteil der Reflexion gemäß der Fresnelschen Formeln (siehe Abschnitt 3.2.1). Für Pulse, die nur geringe Abträge weniger Mikrometer erzeugen, spielt der Geometrieeinfluss während des Pulsverlaufs eine untergeordnete Rolle. Der Geometrieeinfluss ist daher eher pulsübergreifend von Bedeutung.

Da somit die absorbierte Intensität im Prozessverlauf durch die Änderung der Kantenform beeinflusst wird, ändert sich das Verhältnis zwischen Verdampfen und Aufschmelzen. Unterschreitet die absorbierte Intensität den pulslängenbezogenen Abtragschwellwert, kann der Werkstoff nur noch aufgeschmolzen werden. Aufgrund dessen ist für eine hinreichend lange Bestrahlung, entweder durch einen sehr langen oder viele kurze Pulse, die Kantenformung ein selbst stoppender Prozess.

Die Pulsdauer hat einen wesentlichen Einfluss auf die Ausbildung der Wärmeeinflusszone. Je länger der Puls, desto größer ist die Wärmeeinflusszone. Der Temperaturgradient in der Wärmeeinflusszone hängt von der Intensität ab. Zwischen zwei Pulsen kühlt die Wirkstelle ab, indem Wärme in das Grundmaterial abfließt. Durch eine lange Bestrahlung mit vielen Pulsen hinreichend hoher Frequenz kann somit auch die Größe der Wärmeeinflusszone beeinflusst werden. Das sich bei der Abkühlung ausbildende Gefüge hängt sowohl vom Temperaturprofil als auch von der Abkühlungsgeschwindigkeit ab. Hohe Temperaturgradienten bedeuten eine schnellere Abkühlung durch Wärmeleitung im Werkstoff.

Schmelze, die während des Abtragprozesses ausgetrieben wurde, lagert sich in der Regel am Rand der Wirkstelle in Form von Aufwürfen ab. Aufgrund ihrer Geometrie (steile Flanken) und Lage absorbieren die Aufwürfe nur wenig Energie. Deswegen werden sie durch den Abtragprozess an sich nicht abgetragen. Durch eine Verschiebung der Strahlposition oder Fokusvergrößerung ist es aber möglich, die Aufwürfe umzuschmelzen. Die Aufwurfbildung wird reduziert, wenn der Dampfdruck verringert wird oder sich aber weniger Schmelze in der Wirkstelle befindet, die ausgetrieben werden kann.

Die absorbierte Intensität I_A in jedem Punkt der Kantenkontur ergibt sich aus dem absorbierten Anteil der beaufschlagten Intensität und berechnet sich zu:

$$I_A = I(x) \cdot \cos(\varphi(x)) \cdot A(\varphi(x)) \quad (7.3)$$

Wird die Winkelabhängigkeit der Fresnelabsorption vernachlässigt, so dass sich für A eine Konstante ergibt, kann Gleichung 7.3 nach dem Winkel φ aufgelöst werden. Für den Grenzfall des Materialabtragendes gilt $I_A = I_S$, so dass entsprechend substituiert werden kann.

$$\varphi(x) = \arccos\left(\frac{I_S}{I(x) \cdot A(0)}\right) \quad (7.4)$$

Die Kantenkontur soll durch die Funktion $f(x)$ beschrieben werden. Die erste Ableitung stellt die Steigung dar und es gilt:

$$f'(x) = \frac{df}{dx} = \tan(\varphi(x)) \quad (7.5)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 7.4 in Gleichung 7.5 und vereinfachen der Terme ergibt sich:

$$f'(x) = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{I_S}{I(x) \cdot A(0)}\right)^2}}{\frac{I_S}{I(x) \cdot A(0)}} \quad (7.6)$$

Die Kantenkonturfunktion läßt sich durch die Integration von Gleichung 7.6 bestimmen. Von der Intensitätsfunktion $I(x)$ hängt ab, ob das Integral analytisch oder numerisch bestimmt werden kann.

$$f(x) = \int_{-\infty}^0 \frac{\sqrt{1 - (I_S/A(0) \cdot I(x)^{-1})^2}}{I_S/A(0) \cdot I(x)^{-1}} dx \quad (7.7)$$

Soll die Winkelabhängigkeit der Absorption und auch die Strahlkaustik berücksichtigt werden, sind unter Zuhilfenahme numerischer Rechenmethoden die Nullstellen der Funktion der Intensitätsdifferenz in jedem Punkt zu ermitteln:

$$\Delta I = I(x, z) \cdot \cos(\varphi(x)) \cdot A(\varphi(x)) - I_S \quad (7.8)$$

Da die Intensität $I(x, z)$ auf der Kontur wiederum von der Position in Strahl-ausbreitungsrichtung z abhängt, ist bei der Berechnung iterativ vorzugehen.

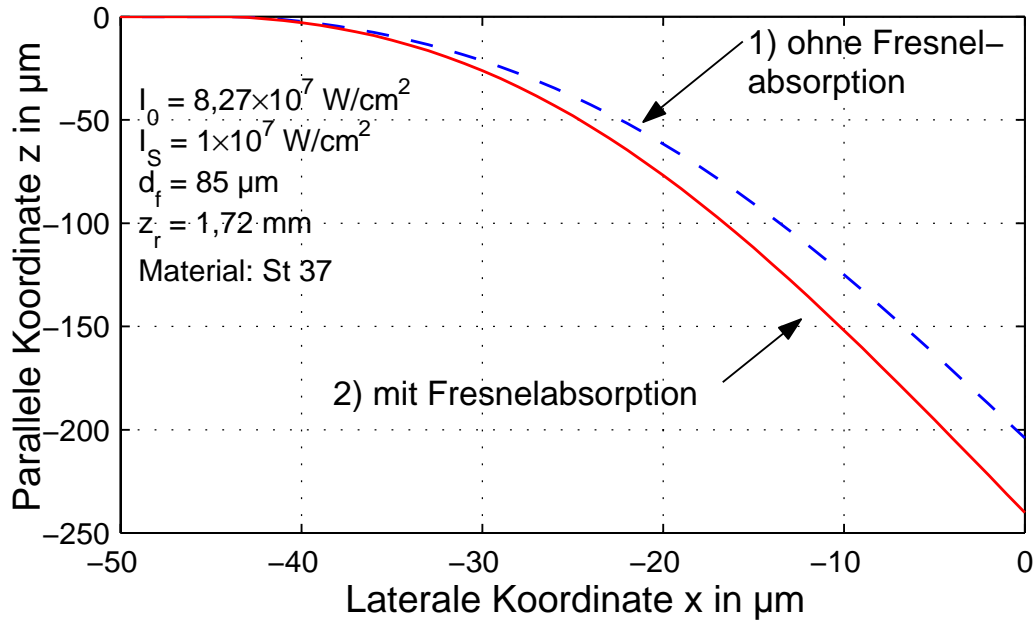


Abb. 7.14: Auswirkung der Fresnelabsorption auf die Kantenkontur

Die Auswirkung der Fresnelabsorption ist aus Abbildung 7.14 ersichtlich, wo zwei unterschiedlich berechnete Konturen gegenübergestellt werden. Für beide Konturen wurden die gleichen Material- und Strahlparameter zugrunde gelegt. Kontur 1 wurde mit Hilfe eines numerischen Lösungsverfahrens aus Gleichung 7.7 und Kontur 2 anhand der Lösung von Gleichung 7.8 bestimmt. Die Kontur 2 berücksichtigt die winkelabhängige Fresnelabsorption sowie die Strahlkaustik des fokussierten Laserstrahls. Bezüglich des parallelen Kantenmaßes ergibt sich ein Unterschied von 40 µm zwischen den Ergebnissen.

Ein Vergleich zwischen berechneten Kantenkonturen nach Gleichung 7.8 und Messergebnissen ist in Abbildung 7.15 dargestellt. In den Schlifffbildern zu erkennen ist jeweils eine Schicht oxidiert und wiedererstarrrter Schmelze. Bei der links dargestellten Kontur 1 (Abb. 7.15a) liefert der Vergleich eine gute Übereinstimmung, denn die berechnete Kontur entspricht weitestgehend der Konturlinie zwischen Grundmaterial und wiedererstarrrter Schmelzschicht. Die reale Konturgrenze weist ebenfalls die berechnete Form auf (die rechte eingezeichnete Kurve), zeigt allerdings einen lateralen Versatz von ungefähr 12 µm gegenüber der berechneten Kontur. Ob dieser Versatz von einem Positionierungsfehler der Versuchsanlage herrührt oder im Zusammenhang mit der Schmelzschicht steht, kann an dieser Stelle nicht eindeutig bestimmt werden.

Bei der rechts dargestellten Kontur 2 (Abb. 7.15b) ist ein deutlicher Unterschied zu erkennen, der darauf zurückgeführt werden muss, dass die Wärmeleitung im Material und die so erfolgende Erhitzung des Kantenbereichs nicht mehr vernachlässigt werden kann. Gerade am Unterschied zwischen

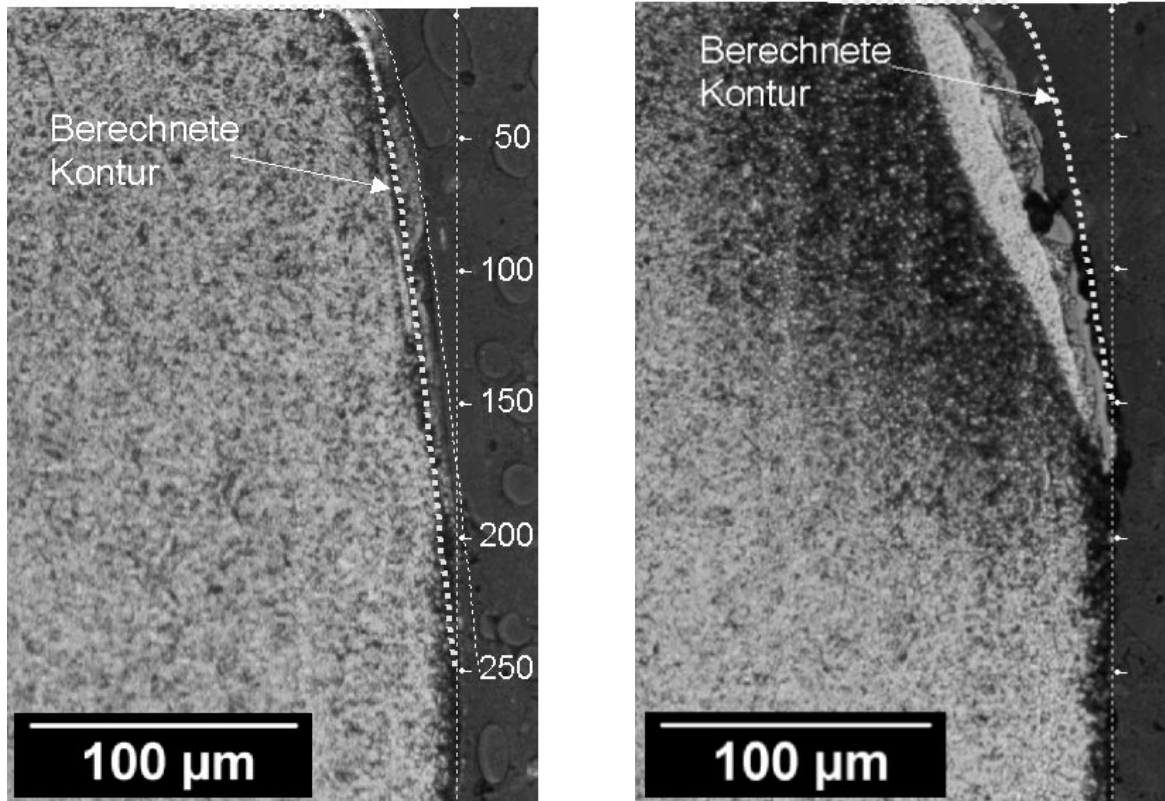
(a) **Kontur 1**Intensität $I_0 = 8,66 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ Pulsdauer $\tau_H = 260 \text{ ns}$ Streckenenergie $E_s = 10,2 \text{ J/mm}$ (b) **Kontur 2**Intensität $I_0 = 5,22 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ Pulsdauer $\tau_H = 380 \text{ ns}$ Streckenenergie $E_s = 18,1 \text{ J/mm}$

Abb. 7.15: Vergleich zwischen berechneten Konturen und Schliffbildern.
Werkstoff: 100Cr6; bearbeitet mit QS-Nd:YAG-Laser. Fokusbereich $d_f = 85 \mu\text{m}$, Einstrahlwinkel $\alpha = 0^\circ$

den lateralen Kantenmaßen wird dies deutlich. Neben den Pulslängen und Intensitäten unterscheiden sich die beiden Fälle auch in der Anzahl der Pulse. Bei zweifachem Überfahren mit einem Vorschub von $v = 1,25 \text{ mm/s}$ und einem Fokusbereich von $85 \mu\text{m}$ wurden so im linken Fall 2720 Pulse¹ und im rechten Fall 5500 Pulse eingebracht. Bei einem Pulsabtrag von $2 \mu\text{m}$ würden insgesamt 125 Pulse für den Abtrag ausreichen, die überzähligen Pulse heizen somit nur den Kantenbereich auf.

Nach dem erläuterten Modell ist das Erzeugen einer exakten Verrundung insgesamt nicht möglich, denn dafür müsste die Intensität, die in der Ebene der parallelen Seitenfläche wirkt, unendlich groß sein. Realisierbar ist allerdings eine Fase, wenn ein rechteckiges Strahlprofil eingesetzt wird.

¹Die Pulsanzahl berechnet sich über die erforderliche Zeit zum Überschreiten des Fokusbereichs. Allerdings variiert dabei die Intensität pro Puls dem Intensitätsprofil gemäß.

7.4.3 Auswirkung der Parameter auf die Kantenmaße

Die Intensitätsverteilung (z.B. TEM₀₀- oder Tophat-Profil) wirkt sich primär auf die Form und somit sekundär auf die Kantenmaße der erzeugten Kantenkontur aus. Die Größe der Kontur und damit auch die für das Entgraten relevanten Kantenmaße werden bei gegebenem Strahlprofil und -durchmesser im wesentlichen durch folgende Parameter bestimmt:

- Maximale Intensität I_0 ,
- Fokusslage (Position z der Fokusebene zur Kante in Strahlrichtung) und
- Position x der Strahlachse zur Kante senkrecht zur Strahlrichtung.

Aufgrund von Leistungsschwankungen der Strahlquelle und Ungenauigkeiten bei der Strahlpositionierung zur Kante in der Entgratanlage, sind diese drei Parameter mit Toleranzen behaftet. Im Folgenden sollen die Auswirkungen auf die Kantenmaße rechnerisch abgeschätzt werden. Die Parameterwerte, die sich aus einer für das Entgraten typischen Lasereinstellung ergeben, bilden dabei die Berechnungsgrundlage und sind in Tabelle 7.1 aufgeführt.

Laser	QS-Nd:YAG-Laser ($\lambda = 1064 \text{ nm}$)	
	Fokussdurchmesser	$d_f = 33,6 \mu\text{m}$
	Rayleighlänge	$z_R = 758 \mu\text{m}$
	Intensität	$I_0 = 5,56 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$
	Pulslänge	$\tau_H = 300 \text{ ns}$
Werkstoff	Materialkennwerte für St 37	

Tab. 7.1: Parameterwerte für die Berechnung der Diagramme 7.16, 7.17 u. 7.18

Abbildung 7.16 zeigt den Einfluss der Intensität auf das laterale und parallele Kantenmaß. Eine Intensitätserhöhung bewirkt in jedem Fall mehr Materialabtrag, so dass auch die Kantenmaße größer werden. Der in den Versuchen eingesetzte Laser hat eine mittlere Leistungsschwankung im Bereich von 3 %, so dass das stärker betroffene parallele Kantenmaß in diesem Fall eine Toleranz von ungefähr 2 % aufweist.

Änderungen in der Fokusslage wirken sich auf die Höhe der Intensität und ebenso auf den Strahldurchmesser in der Bearbeitungsebene aus. Eine Fokusslagevariation wirkt sich somit gegenläufig auf das laterale und parallele Kantenmaß aus, wie Abbildung 7.17 zeigt. Durch eine Defokussierung wird die bestrahlte Fläche größer, so dass auch das laterale Kantenmaß ansteigt. Gleichzeitig sinkt die Intensität wodurch das parallele Kantenmaß kleiner wird. Das größte parallele Kantenmaß lässt sich erzielen, wenn die Fokusebene und somit die maximale Intensität am tiefsten Punkt der Kantenkontur liegt.

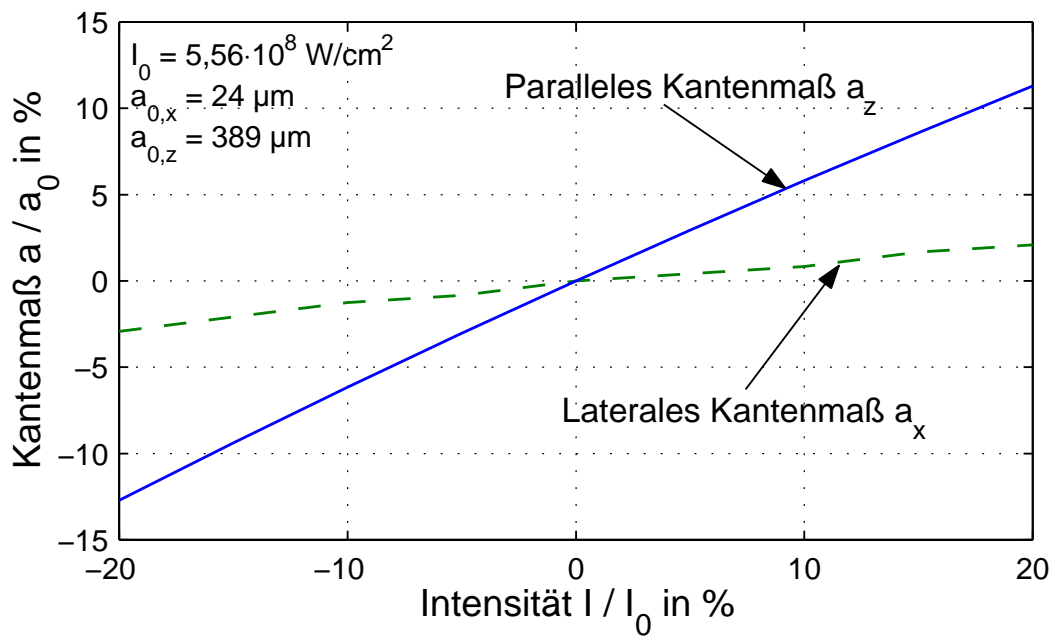
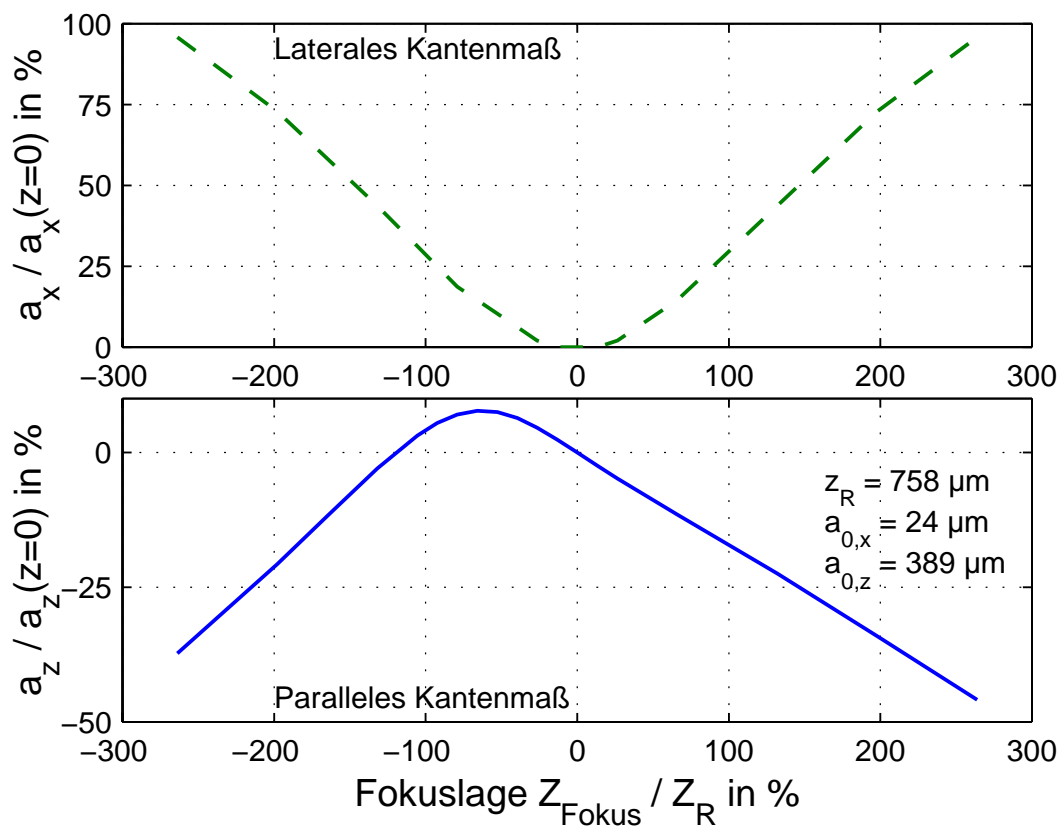


Abb. 7.16: Einfluss der Intensität auf die Kantenmaße

Abb. 7.17: Einfluss von Defokussierung auf die Kantenmaße. (Diagramm oben: Laterales Kantenmaß a_x , Diagramm unten: Paralleles Kantenmaß a_y)

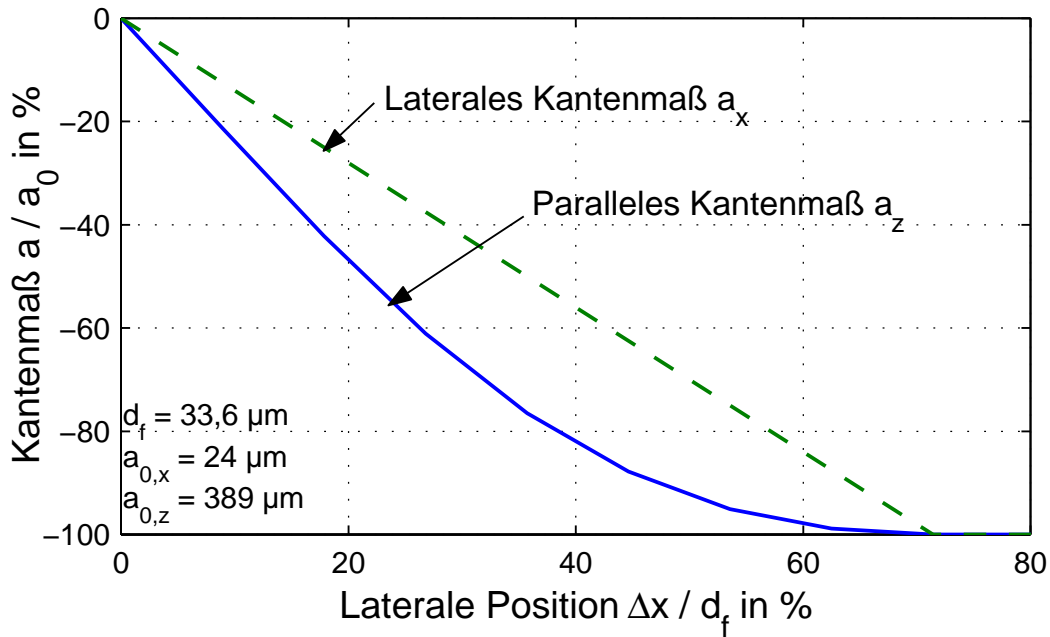


Abb. 7.18: Einfluss der lateralen Positionierung auf die Kantenmaße

Nach Abbildung 7.18 wirkt sich die Position x der Strahlachse im Vergleich zu den beiden anderen Parametern am stärksten auf die Kantenmaße aus. Zwischen der Position und dem lateralem Kantenmaß besteht ein linearer Zusammenhang. Ist der Strahl soweit außerhalb der Kante positioniert, dass die auf die Kante treffende Intensität unterhalb der Abtragschwellintensität liegt, wird kein Abtrag erzielt (dabei ist zu beachten, dass für den berechneten Fall der Abtragdurchmesser größer als der Fokusbereich ist). Bei Positionierung der Strahlachse innerhalb des Materials entsteht ein Übergang zwischen einem Kantenabtrag und Erzeugen einer Nut auf der oberen Seitenfläche der Kante. In diesem Fall spielen Wärmeleitung und Schmelzbaddynamik eine so große Rolle, dass das hier vorgestellte Modell keine brauchbaren Ergebnisse liefert.

Der große Einfluss der Positionierung auf die Kantenmaße und somit letztlich auf das Entgratergebnis zeigt, dass das Laserentgraten basierend auf Mikroabtragen eine präzise Verfahrensführung erfordert. Bei einer zulässigen Kantenmaßtoleranz von 10% ist für den Fall nach Abbildung 7.18 eine Positioniergenauigkeit von $1,43 \mu\text{m}$ erforderlich, was einen sehr hohen Anspruch an die Anlagentechnik stellt. Daher erscheint es zweckmäßig mit großen Fokusbereichen zu arbeiten, so dass sich die absoluten Positionsabweichungen relativ gesehen nicht so stark auswirken. Im Hinblick auf eine gleichmäßige Verrundung in lateraler und paralleler Richtung sollte mit geringen Spitzenintensitäten gearbeitet werden. Anlagentechnisch kann dieses durch geringe Strahlaufweitungen und Fokussierobjektive mit langer Brennweite umgesetzt werden. Als zusätzlicher positiver Nebeneffekt wird dann die

Rayleighlänge des Strahls und somit die Schärfentiefe der Abbildung größer, so dass der Einfluss von Schwankungen der Fokusslage verringert wird.

7.5 Prozessgestaltung zum Laserentgraten

Aus dem erarbeiteten Prozessverständnis zum Laserentgraten läßt sich eine Vorgehensweise zur Verfahrensentwicklung ableiten, die in diesem Abschnitt skizziert werden soll.

7.5.1 Auswahl des Prozessmechanismus

Um für eine Entgrataufgabe ein Laserentgratverfahren zu entwickeln, ist im ersten Schritt einer der möglichen Prozessmechanismen auszuwählen. Dabei bestimmen hauptsächlich die technologischen Randbedingungen der Entgrataufgabe, wie zum Beispiel die zu erzeugenden Kantenmaße und die tolerierbare Wärmeeinflusszone, die Auswahl. Die grundlegenden vier Prozessmechanismen zum Laserentgraten sind dazu mit ihren Eignungsschwerpunkten in Tabelle 7.2 gegenübergestellt.

Laserspanen	Umschmelzen	Mikroabtragen	Feinschneiden
Vorteile			
<ul style="list-style-type: none"> • Verrunden und Abtragen der Kanten • Hohe Abtragrate • Kantenmaße bis 500 μm 	<ul style="list-style-type: none"> • Verrunden der Kanten • Geringe Rauigkeit der Kantenverrundung • Geringer Positionieraufwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Sichere Gratentfernung • Geringer Wärmeeinfluss • Kleine Kantenmaße 	<ul style="list-style-type: none"> • Erzeugen von scharfen Kanten • Sehr geringer Wärmeeinfluss • Kurze Prozesszeiten
Nachteile			
<ul style="list-style-type: none"> • Große Grate verbrennen unregelmäßig • Sehr große WEZ • Nur oxidierbare Stähle • Prozessgas erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> • Schmelzwulstbildung an der Kante • Große WEZ • Unregelmäßiges Gefüge wiedererstarrter Schmelze • Gefahr von Schmelzspritzern und Schmelztropfenbildung an der Kante 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwurf- bzw. Sekundärgratbildung • Geringe Positioniertoleranz Strahl zu Grat • Geringe Abtragrate • Hohe Oberflächenrauheit 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr geringe Positioniertoleranz Strahl zu Grat • Keine Kantenverrundung

Tab. 7.2: Gegenüberstellung der Prozessmechanismen zum Laserentgraten

Während das Laserspanen als abgegrenzter Prozessmechanismus zu verstehen ist, sind die Übergänge zwischen Umschmelzen, Mikroabtragen und Feinschneiden fließend. Zum einen können aufgrund der Unregelmäßigkeit des Grates im Verlauf einer Kante sowohl Feinschneiden und Mikroabtragen die Gratentfernung bewirken, zum anderen lässt sich durch die Laserstrahlintensität der Anteil zwischen Aufschmelzen und Verdampfen steuern. Diese drei Mechanismen sollen daher im Gegensatz zum makroskopischen Laserspanen als Laserfeinentgraten zusammengefasst werden.

7.5.2 Eingrenzung von Parameterbereichen

Aus dem gewählten Prozessmechanismus ergibt sich hinsichtlich der Prozessparameter primär eine Vorgabe für die Intensität. Durch die Strahlführung und -formung sowie die Positionierung des Laserstrahls zum Grat ist diese Intensität in der Wirkstelle zu gewährleisten. Somit lassen sich bevorzugte Bereiche für die Parameter der Positionierung ableiten, die in Abbildung 7.19 schematisch dargestellt sind.

Durch die Fokussierung und die Fokusslage ist der resultierende Strahldurchmesser in der Wirkstelle so einzustellen, dass die erforderliche Intensität für den Prozess erreicht wird. Während beispielsweise beim Feinschneiden der Grate im Fokus gearbeitet wird, um hohe Intensitäten in der Wirkstelle zu erreichen, empfiehlt sich beim Laserspanen außerhalb des Fokus zu arbeiten, um die Leistung des Lasersystems ausnutzen zu können.

Der technisch realisierbare Einstrahlwinkel wird in vielen Anwendungsfällen durch die Gratlage am Werkstück und die Freiheitsgrade des zur Verfügung stehenden Bewegungssystems bestimmt. Wird beispielsweise zum Entgraten


	Laserspanen	Umschmelzen	Mikroabtragen	Feinschneiden
Intensität				
Kontur-entgraten	$0^\circ < \alpha < 45^\circ$ $-d_w < x < 0$	$0^\circ < \alpha < 45^\circ$ $-d_w < x < 0$	$-45^\circ < \alpha < 0^\circ$ $0 < x < d_w$	
Scan-entgraten		$\alpha = 0^\circ / 90^\circ$ $x = \text{unbestimmt}$		
Fokusslage	$0 < z < +$	$0 < z < +$		$z = 0$
Durchmesser	$100 < d_w < 500 \mu\text{m}$			$d_w < h_0$
Pulsüberlapp		$50\% < u < 99\%$		$20\% < u < 70\%$

Abb. 7.19: Bevorzugte Bereiche der Prozessparameter zur Strahlpositionierung in Abhängigkeit vom Prozessmechanismus

von Bohrungen ein Scanner eingesetzt, ergibt sich eine Zwangslage des Einstrahlwinkels von 0° bzw. 90° zum Grat. Beim sublimationsbasierten Abtragen und Feinschneiden der Grate ist es vorteilhaft, wenn die Abtragrichtung nicht in das Werkstück zeigt. So wird sichergestellt, dass die anliegenden Oberflächen nicht beschädigt werden, falls der Materialabtrag zu groß ist. Beim wärmeleitungsbasierten Umschmelzen und Laserspanen eignet sich dagegen ein Einstrahlwinkel von 45° , weil so die gesamte Strahlenergie in den Kantenbereich eingebracht wird.

7.6 Fehlermöglichkeiten-Einfluss-Analyse

7.6.1 Fehlerklassifizierung anhand des Entgratergebnisses

Gemäß den Bewertungskriterien (siehe Kapitel 5.3) für das Laserentgraten wird das Ergebnis des Prozesses in erster Linie an der Gratfreiheit beurteilt. Neben dem Fehler, dass der Grat vollständig an der Kante verbleibt, können Restgrate und -partikel an der Kante verbleiben, so dass keine Gratfreiheit erreicht wird. Die möglichen Prozessfehler sollen unabhängig vom Wärmeeinfluss wie folgt klassifiziert werden:

- Restgrate G entlang der Kantenlänge
- Geometrie des erzeugten Kantenprofils P
- Verrundungstoleranz K entlang der Kantenlänge
- Beschädigung anliegender Oberflächen O

Die möglichen Fehler je Klasse sind in Abbildung 7.20 skizziert. Die Fehler, bei denen Gratreste verbleiben oder die eine Beschädigung des Werkstücks bewirken, sind in jedem Fall als kritisch anzusehen. Dazu ist auch die Aufwurfbildung (P3 und P4) zu zählen, wenn Sekundärgrate entstehen, die deutlich über der tolerierten Rauigkeit der anliegenden Oberflächen liegen. Schmelzperlen (O3) und auch Ablagerungen durch Ablationsprodukte (O4) können toleriert werden, falls sie durch nachfolgende Reinigungsschritte leicht entfernt werden können. Die Kurzbezeichnungen für die Fehler finden in den nachfolgenden Tabellen 7.4, 7.5, 7.6 und 7.7 Verwendung.

7.6.2 Auswirkung fehlerhafter Parameter

Wie die Entgratfehler aufgrund fehlerhafter Prozessparameter hervorgerufen werden können, soll in Anlehnung an die Fehlermöglichkeiten-Einfluss-Analyse (FMEA) [96] beschrieben werden. Dazu wird für die in dieser Arbeit

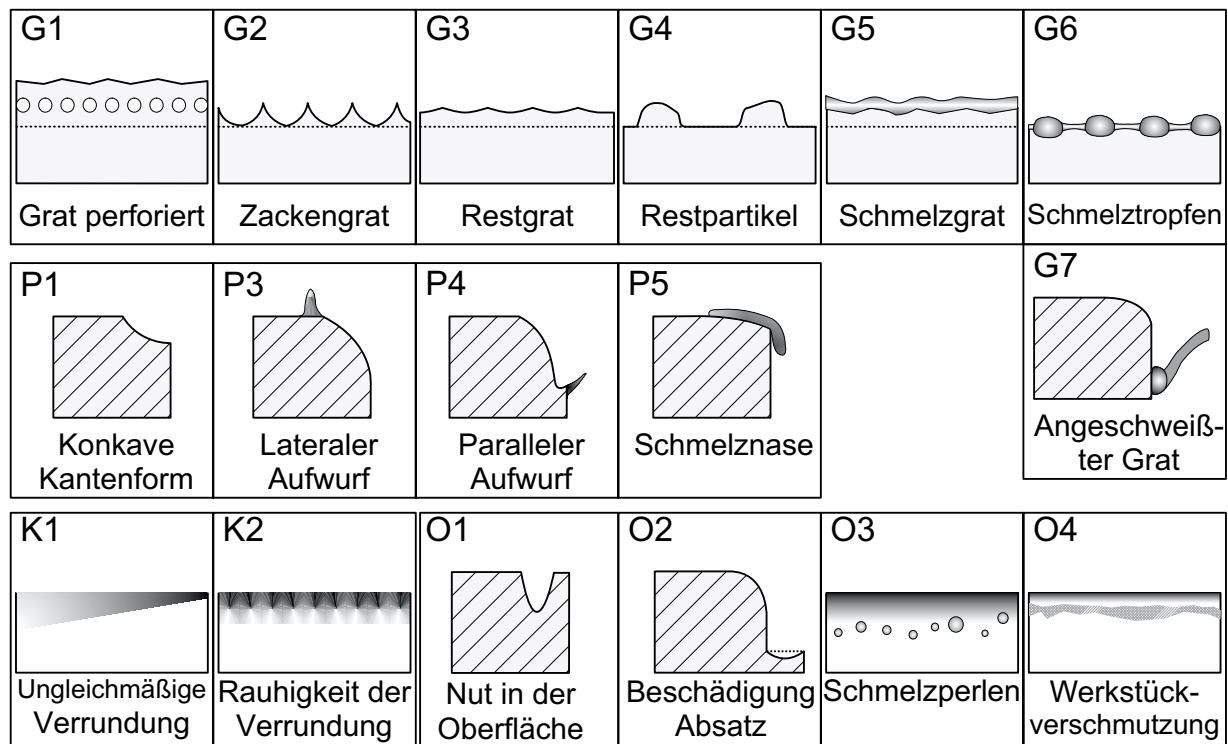


Abb. 7.20: Mögliche Fehler einer laserentgrateten Kante

betrachteten Parameter analysiert, wie sie sich auf den Entgratprozess auswirken und welche Fehler sie bewirken können. Aufgrund der unterschiedlichen Prozessmechanismen werden Laserspanen (Tabelle 7.5), Umschmelzen (Tabelle 7.6) und Mikroabtragen/Feinschneiden (Tabelle 7.7) getrennt, der Einfluss der Positionierung (Tabelle 7.4) dagegen übergreifend betrachtet.

In den nachfolgenden Tabellen werden auch Maßnahmen gegen den jeweils möglichen Entgratfehler vorgeschlagen. In der Spalte „Prozess“ ist aufgeführt, wie durch eine Variation der übrigen Prozessparameter eine Verbesserung erzielt werden kann. Mögliche Maßnahmen, um mit einer Prozesssicherung das Auftreten der Fehler zu erkennen, sind in der Spalte „PSM“ vermerkt.

AB	Abstandskontrolle der Fokusoptik zur Wirkstelle
T	Überwachung der Temperatur in der Wirkstelle
RR	Überwachung der rückreflektierten Laserstrahlung
PL	Überwachung des prozessinduzierten Plasmasignals
Pos	Positionsüberwachung Laserstrahl zu Werkstückkante
L	Überwachung der emittierten Laserleistung
BV	Bildverarbeitungssystem im off-line Betrieb
BCK	Einsatz eines Backing-Materials
DF	Defokussierte Strahlung
FL	Strahlfokus liegt in der Wirkstelle

Tab. 7.3: Mögliche Maßnahmen zur Prozesssicherung beim Laserentgraten

Die denkbaren Prozesssicherungsmaßnahmen mit ihren Abkürzungen sind in Tabelle 7.3 aufgeführt.

Tabellen der Fehlermöglichkeiten-Einfluss-Analyse

Tab. 7.4: FMEA-Tabelle für Fehler bei der Positionierung des Laserstrahls zur Kante

Nr.	Fehler	Fehlerauswirkung	Ursachen	Prozess	PSM
Z	Fokuslage	Kantenmaß a_x zu groß	Abtragdurchmesser d_a zu groß	Objektiv-Brennweite \uparrow	AB
		Kantenmaß a_z zu gering	Geringe Intensität \rightarrow geringe Abtragtiefe		
		Restgrat (G3) Schmelzgrat (G5)	Intensität zu gering um T_v zu erreichen		T
		Beschädigung von Bauteilbereichen in Strahlrichtung (O2)	Intensität außerhalb des Fokus über Abtragschwelle	Fokuslage anheben	BCK
P.1	Strahlposition [$x > d_w/2$]	Grat verbleibt vollständig an Kante	Grat wird nicht bestrahlt	Scanentgraten	T, RR, PL
P.2	[$x \approx < 0$]	Sekundärgrat durch Aufwurfbildung (P2 u. P3)	Strahlachse liegt dicht innerhalb des Werkstücks	$d_f \uparrow$, Flat-Top-Strahlprofil	
P.3	[$x < -d_w/2$]	Bauteiloberfläche beschädigt (O1)	Abtrag auf der Oberfläche	$I_m \downarrow$, $E_s \downarrow$	Pos, RR
P.4	[variabel]	Ungleichmäßige Kantenverrundung (K1)	Unterschiedlich große absorbierte Streckenenergie	$d_f \uparrow$	Pos
W.1	Strahlwinkel [$\alpha < > 45^\circ$]	Unsymmetrische Kantenmaße ($a_x \neq a_z$)	Ungleichmäßiger Abtrag an Seiten- u. Oberfläche	$I_m \downarrow$	
W.2	[$0 > \alpha > \approx 10^\circ$]	Sekundärgrat durch Aufwurfbildung (P3)	Abtragtiefe a_{max} liegt dicht an Bauteilrand	$E_s \downarrow$	RR
F.1	Fokusbrennmesser [zu groß]	Kantenmaße zu groß (bei $\alpha = 0^\circ$ Kantenmaß a_x)	Abtragdurchmesser d_a zu groß	Strahlaufweitung \uparrow	
		Grat verbleibt am Werkstück	Intensität zu gering um T_v zu erreichen	$P_{av} \uparrow$	
F.2	[zu klein]	Kantenmaße zu gering (bei $\alpha = 0^\circ$ Kantenmaß a_x)	Abtragdurchmesser d_a zu klein	Strahlaufweitung \downarrow	

Tab. 7.5: FMEA-Tabelle für Fehler beim Laserspanentgraten

Nr.	Fehler	Fehlerauswirkung	Ursachen	Prozess	PSM
1	Grathöhe [zu lang]	Anhaftende Oxidspäne	Instabile Spanbildung durch unregelmäßiges Verbrennen der Grate	$n \uparrow$	T, RR
2	Kein cw-Betrieb	Keine Spanbildung	Intensität zu groß, so dass T_v überschritten wird		T
3.1	Laserleistung [zu gering]	Angeschmolzene Gratfahnen (G5)	Grat wird nicht vollst. aufgeschmolzen	$v \downarrow$, FL	
		Keine Spanablösung	Schmelzfilmdicke zu gering		
3.2	[zu groß]	Keine Spanbildung	Überschreiten von T_v so dass Material verdampft	$v \uparrow$, DF	T
4.1	Vorschub [zu langsam]	Schmelzperlen auf umliegenden Oberflächen (O3)	Schmelzaustrieb durch Überhitzen der Schmelze	$P_{av} \downarrow$, DF	
		Konkave Kantenform (P1)	Oxidspan zu dick	DF	
		Nuteinbringung in die Kante	Keyhole-Abtrag, Materialabtrag durch Überschreiten von T_v		T
		Keine Spanablösung	Schmelzfilmdicke zu groß		
		Starke Rauchbildung	Verbrennen von viel Schmelze		
4.2	[zu schnell]	Keine Spanablösung	Schmelzfilmdicke zu gering	$I_m \uparrow$, $d_f \uparrow$, $n \uparrow$	
		Angeschmolzene Gratfahnen (G5)	Prozesszeit nicht ausreichend für Verbrennung		
5.1	Sauerstoff [fehlt]	Keine Spanbildung	Schmelze wird nicht oxidiert		
5.2	[zu wenig]	Schlechte Spanbildung	Nicht genügend Schmelze wird oxidiert	$p_{Duese} \uparrow$	
5.3	Gasdruck zu hoch	Unregelmäßige Spanbildung	Teile der Schmelze werden vom Gasstrahl ausgetrieben	Gasdruck \downarrow , Düsenabstand \uparrow	

Tab. 7.6: FMEA-Tabelle für Fehler beim Laserumschmelzentgraten

Nr.	Fehler	Fehlerauswirkung	Ursachen	Prozess	PSM
1.1	Gratvolumen [zu groß]	Grat wird angeschmolzen (G5)	Streckenenergie nicht ausreichend, um Grat aufzuschmelzen	$E_s \uparrow$	

Fortsetzung auf Seite 109

Fortsetzung von Seite 108

		Schmelzperlen an umliegenden Oberflächen (O3)	Hohe Schmelzbad-dynamik aufgrund großem Schmelzvolumen	$v \uparrow \& n \uparrow$	
		Schmelznasen an der Kante (P4)	Schmelzfluss aufgrund großen Schmelzvolumens	$v \uparrow \& n \uparrow$	
	1.2	Grathöhe [zu lang]	Angeschweißte Grat-fahren (G7)	Grat wird partiell durchtrennt, so dass lange Gratfahren verbleiben	$d_f \uparrow$
1.3	[unregelmäßig]	Schmelztropfen an der Kante (G6)	Ungleichmäßiges Aufschmelzen des Grates	$I_m \uparrow$	T
2.1	Repetitions-rate [zu gering]	Aufwurfbildung (P2)	Schmelzaustrieb durch Überheizen der Schmelze	$P_{av} \downarrow, v \uparrow$	T
		Rauhe Oberfläche der Kantenverrundung (K2)	Schmelzaustrieb durch Überheizen der Schmelze	$P_{av} \downarrow, v \uparrow$	T
		Einzelne Pulseinbrände an der Kante	Pulsabtrag aufgrund hoher Intensität, geringer Pulsüberlapp	$v \downarrow, DF$	RR, PL
		Partielles Durchtrennen des Grates	Schnittfuge durch lokalen Abtrag	$DF, d_f \uparrow$	
2.2	[zu hoch]	Schmelzperlen auf umliegenden Oberflächen (O3)	Viel Schmelze durch hohen Pulsüberlapp	$v \uparrow$	
3.1	Laserleistung [zu gering]	Gratfahren angeschmolzen (G5)	Streckenenergie zu gering um Grativolumen aufzuschmelzen	$v \downarrow$	L
		Kantenmaße zu klein	Energie nicht ausreichend um großen Bereich aufzuschmelzen		
3.2	[zu groß]	Konkave Kantenform (P1)	Materialabtrag durch Überheizen der Schmelze		L
		Rauhe Oberfläche der Kantenverrundung (K2)	Verbrennen der Schmelze durch Überheizen	Prozessgas	
4.1	Vorschub [zu langsam]	Konkave Kantenform (P1)	Materialabtrag durch Überheizen der Schmelze	$P_{av} \downarrow$	T, RR
		Schmelznasen an der Kante (P4)	Schmelzfluss aufgrund großen Schmelzvolumens	$n \uparrow$	
		Schmelzperlen auf umliegenden Oberflächen (O3)	Schmelzaustrieb durch großes Schmelzvolumen		
		Rauhe Oberfläche der Kantenverrundung (K2)	Oszillierende Schmelzbaddynamik	PW mit $f_p \uparrow \uparrow$ und $I_m \downarrow \downarrow$	RR

Fortsetzung auf Seite 110

Fortsetzung von Seite 109

4.2		Unregelmäßiges Gefüge der wiedererstarteten Schmelze	Verwirbelung der Schmelze	Prozessgas	
	[zu schnell]	Schmelztropfen an der Kante (G6)	Nur partielles Aufschmelzen des Grates	$n \uparrow$	T
		Schmelzgrat (G5)	Streckenenergie zu gering um Grat vollständig aufzuschmelzen		

Tab. 7.7: FMEA-Tabelle für Fehler beim Entgraten durch Mikroabtragen und Feinschneiden

Nr.	Fehler	Fehlerauswirkung	Ursachen	Prozess	PSM
1.1	Gratbreite [zu dick]	Gratfahne verbleibt vollständig	Gratfahne wird nicht durchtrennt	$E_s \uparrow, n \uparrow$	RR
1.2	[unregelmäßig]	Restgratpartikel an der Kante (G4)	Abtragtiefe nur partiell ausreichend	$E_s \uparrow, n \uparrow$	RR
1.3	Umgebogene Grate	Verschweißen der Gratfahnen (G7)	Intensität außerhalb des Fokus nicht ausreichend für Abtrag	$I_m \uparrow, z -$	BV
1.4	Schmutzschicht auf Grat	Restgrate und -partikel (G2, G3, G4, G5)	Absorbierte Intensität wird reduziert	$n \uparrow$	BV
2	Repetitionsrate [falsch]	Auswirkung auf Intensität (siehe 3.) und Pulsüberlapp (siehe 4.)	Defekter Q-Switch		
3.1	Intensität [zu groß]	Grat wird nicht abgetragen	Geringer Abtrag durch geringen Schmelzaustrieb		PL
		Kantenmaß a_x zu groß	Abtragdurchmesser d_a steigt	$x > 0$	
		Hohe Oberflächenrauheit der Verrundung (K2)	Starker Schmelzaustrieb	$u \downarrow$	
		Verschmutzung umliegender Oberflächen durch Ablationsprodukte (O4)	Metалldampf kondensiert an Oberflächen	Prozessgas	BV
		Aufwurfbildung (P2)	Zu viel Schmelzaustrieb	$v \uparrow, n \downarrow$	
		Oberflächenverfärbung	Wärmeeinwirkung des Materialdampfes	Prozessgas	T
3.2	[zu gering]	Große Neuhärtezone	Dickerer Schmelzfilm		
		Gefügeänderung im Kantenbereich	Energieabfuhr durch Wärmeleitung		
		Schmelzgrat (G5)	T_v wird nicht erreicht		T
4.1	Streckenenergie [zu klein]	Grat wird nicht abgetragen	Abtragtiefe kleiner als Gratbreite		
4.2	[zu groß]	Konkave Kantenform (P1)	zu viel Materialabtrag	$E_s \downarrow, n \downarrow, v \uparrow$	

Fortsetzung auf Seite 111

Fortsetzung von Seite 110

		Große WEZ	Aufheizen des Kantenbereichs	$v \uparrow$	
5.1	Pulsüberlapp [$u < 0\%$]	Perforierter Grat (G1)	Keine räumliche Verbindung der Pulsabträge	$f_p \uparrow, d_f \uparrow, v \downarrow$	BV
5.2	[$0 < u < \approx 50\%$]	Zackengrat (G2)	Überlapp der Pulsabträge im Randbereich zu gering		BV
		Hohe Oberflächenrauheit der Kantenverrundung (K2)	Pulsüberlapp zu gering	$I_m \downarrow, E_s \uparrow$	
5.3	[$u > \approx 95\%$]	Aufwurfbildung (P2, P3)	Starke Schmelzebildung	$I_m \downarrow$	RR

Kapitel 8

Anwendungsbeispiele

Auf Basis der erarbeiteten Grundlagen zum Laserentgraten kann die Verfahrensentwicklung beispielhaft für praxisrelevante Anwendungen erfolgen. In diesem Abschnitt werden drei Verfahrensentwicklungen zum Laserentgraten durch Umschmelzen, Laserspanen und Mikroabtragen/Feinschneiden aufgezeigt. Ausgehend von der jeweiligen Entgrataufgabe erfolgt die Auswahl eines geeigneten Prozessmechanismus und die anschließende verfahrenstechnische Gestaltung des Entgratprozesses.

8.1 Umschmelzen von Stanzgrat

Beim Stanzen von Durchflussbohrungen in Spritzlochscheiben entstehen auf der Seite des Stanzauszugs Ausbrüche und kleine Grate, die in Abbildung 8.1a dargestellt sind. Die Gratlage an den Bohrungen mit einem Durchmesser im Bereich von $250\,\mu\text{m}$ ist parallel zur Stanzrichtung. Die anhaftenden Grate können die Strahlrichtung und Durchflussmenge des austretenden Flüssigkeitsstrahl beeinflussen. Lösen sich die Grate im eingebauten Zustand der Spritzlochscheibe ab, wird die Funktion des Gesamtsystems beeinträchtigt.

Die Entgrataufgabe umfasst primär das Erzielen von Gratfreiheit am Stanzaustritt. Ferner darf die Durchflussmenge, bezogen auf eine ideal gratfreie Bohrung, durch das Entgraten nicht beeinflusst werden. Weil es sich bei der Spritzlochscheibe um ein kostengünstiges Massenbauteil handelt, müssen die Kosten für das Entgraten gering sein. Aufgrund der geringen Wärmekapazität des Bauteils darf insgesamt nicht viel Energie eingebracht werden, um einen Wärmeverzug zu verhindern. Hinsichtlich der Wärmeeinflusszone gibt es keine Restriktionen, da Aufhärtungen zulässig sind.

Für die Auswahl eines Prozessmechanismus sind zwei Kriterien zu beachten. Zum Entgraten ist es nicht erforderlich, einen Abtrag an der Kante zu erzielen, sondern lediglich die Kante zu verrunden. Deswegen eignet sich als Prozessmechanismus das Umschmelzen der Grate. Um Kosten zu sparen, ist der anlagentechnischen Aufwand gering zu halten. Somit ist es zweckmäßig, die Kante senkrecht zur anliegenden Oberfläche zu bestrahlen, so dass die Gratrichtung parallel zur Laserstrahlrichtung ist.

Da die Oberfläche im Bereich des Strahlaustritts durch den Entgratprozess beeinflusst werden darf, kann hinsichtlich der Verfahrensführung sowohl Kontur- als auch Scanentgraten eingesetzt werden. Einen Vergleich zwischen der gratbehafteten Bohrung und den durch Kontur- und Scanentgraten erzielten Kantenverrundungen zeigt Abbildung 8.1, die gewählten Parametereinstellungen können Tabelle 8.1 entnommen werden.

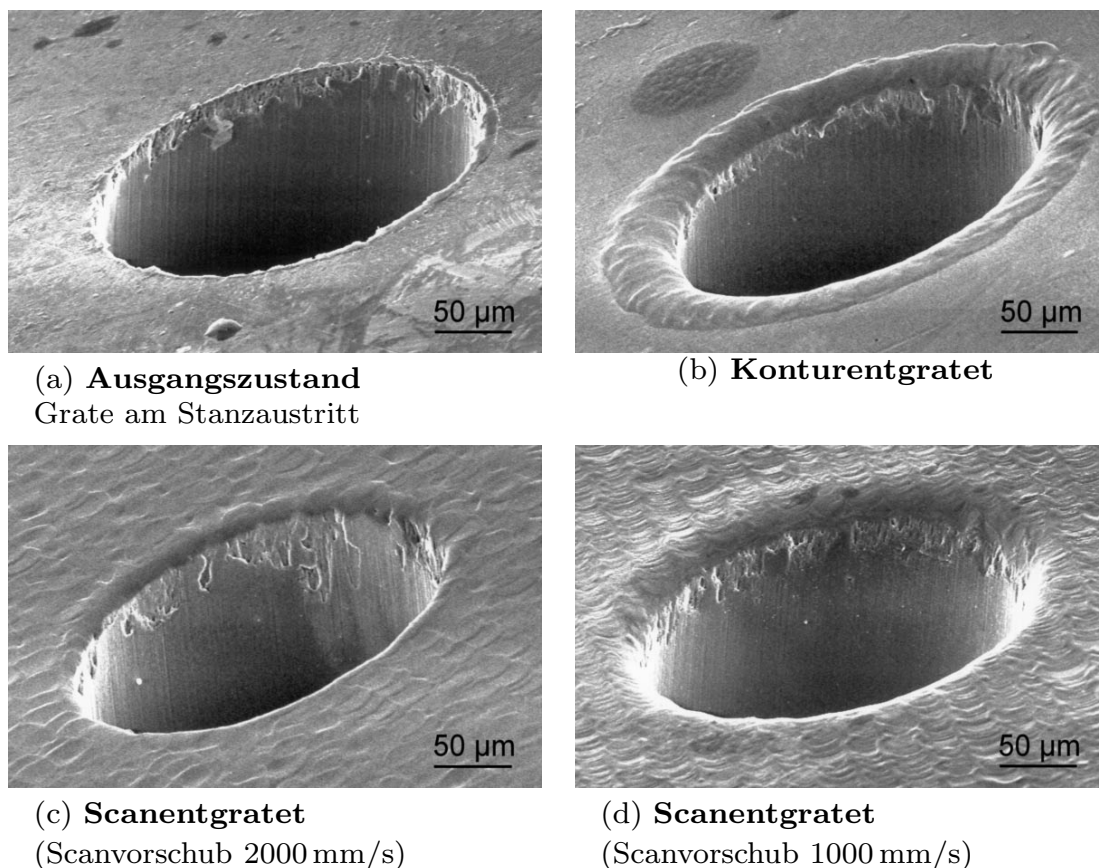


Abb. 8.1: Vergleich der gratbehafteten und laserentgrateten Spritzlochbohrungen durch Kontur- und Scanentgraten anhand von REM-Aufnahmen

Am konturentgrateten Beispiel (Abb. 8.1b) ist der typische Wulst im Kantenbereich zu erkennen, der durch das Umschmelzen entsteht. Durch das Scanentgraten (Abb. 8.1c) hingegen wird nicht nur die Kante, sondern auch die umliegende Oberfläche bearbeitet. Da der unmittelbare Kantenbereich stärker als die Oberfläche aufgeschmolzen wird, entsteht ebenfalls ein Wulst,

Parameter		Konturentgraten	Scanentgraten
Betriebsart		pw ($f_p=32$ kHz)	cw
Leistung	P_{av} in W	2,7	8,7
Fokusbildmesser	d_f in μm	81	50
Intensität	I_m in W/cm^2	$3,3 \cdot 10^6$	$4,4 \cdot 10^5$
Vorschub	v in mm/s	6,3	1000 – 2000
Prozesszeit	t in s	1,0	6,0 – 3,0

Tab. 8.1: Parametereinstellungen und resultierende Prozesszeit für Kontur- und Scanentgraten einer Spritzlochscheibe

der allerdings kleiner als beim Konturentgraten ist. Über die Vorschubgeschwindigkeit kann die Streckenenergie variiert werden. Dass die resultierende Kantenverrundung im Zusammenhang mit der Streckenenergie steht, zeigt sich am Vergleich zwischen den Abbildungen 8.1c und 8.1d.

Die Schliffbilder in Abbildung 8.2 zeigen die erzielten Kantenmaße sowie die Größe der Wärmeeinflusszone. Bei der Scanentgratung ist deutlich zu erkennen, wie die anliegende Oberfläche aufgeschmolzen wurde. Die Dicke dieser Schicht liegt in der Größenordnung von $10\ \mu\text{m}$. Bei der konturentgrateten Kante fällt die wiedererstartete Schmelzschicht dünner aus, was auf die erhöhte Intensität und geringere eingebrachte Energiemenge zurückzuführen ist. Das Grundgefüge des Bauteils wird durch beide Laserentgratverfahren nicht beeinflusst, wie es an der unveränderten Kornstruktur in unmittelbarer Kantennähe erkennbar ist. Die inneren Kantenmaße a_i der konturentgrateten Kante betragen $16\ \mu\text{m}$ in horizontaler und $12\ \mu\text{m}$ in vertikaler Richtung.

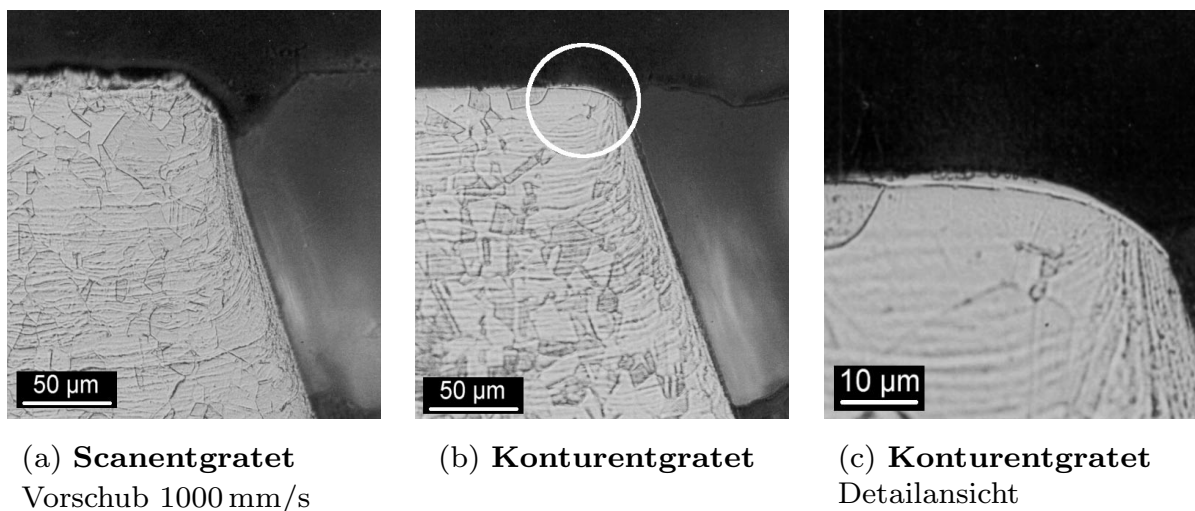


Abb. 8.2: Schliffbilder der laserentgrateten Stanzaustrittsseite (Werkstoff X5CrNi1810)

Um den Einfluss des Laserentgrats auf das Strömungsverhalten des Flüssigkeitsstrahls zu untersuchen, müssen die Durchflusseigenschaften einer Bohrung vor und nach dem Laserentgraten bestimmt werden. Dazu wurden jeweils die Durchflussmenge und der Strahlwinkel, der durch die schräg gestanzte Bohrung entsteht, gemessen. Hinsichtlich der Durchflussmenge konnten bei einer Messungenauigkeit von 0,25 % keine Unterschiede zwischen gratigen und entgrateten Bohrungen erkannt werden. Der Strahlwinkel hängt neben dem Stanzwinkel von der Länge l_B der geradwandigen Spritzlochbohrung und der Bohrungsform im Auslauf ab. Da die Länge l_B durch das Maß der Kantenverrundung reduziert wird, ändert sich der Strahlwinkel in Abhängigkeit der Kantenverrundung. Eine Erhöhung der Streckenenergie, die eine größere Kantenverrundung verursacht, bewirkt einen kleineren Strahlwinkel, wie aus dem Diagramm in Abbildung 8.3 entnommen werden kann. Bei doppelt-logarithmischer Auftragung der Strahlwinkeländerung über der Scanvorschubgeschwindigkeit ergibt sich in guter Näherung eine Gerade.

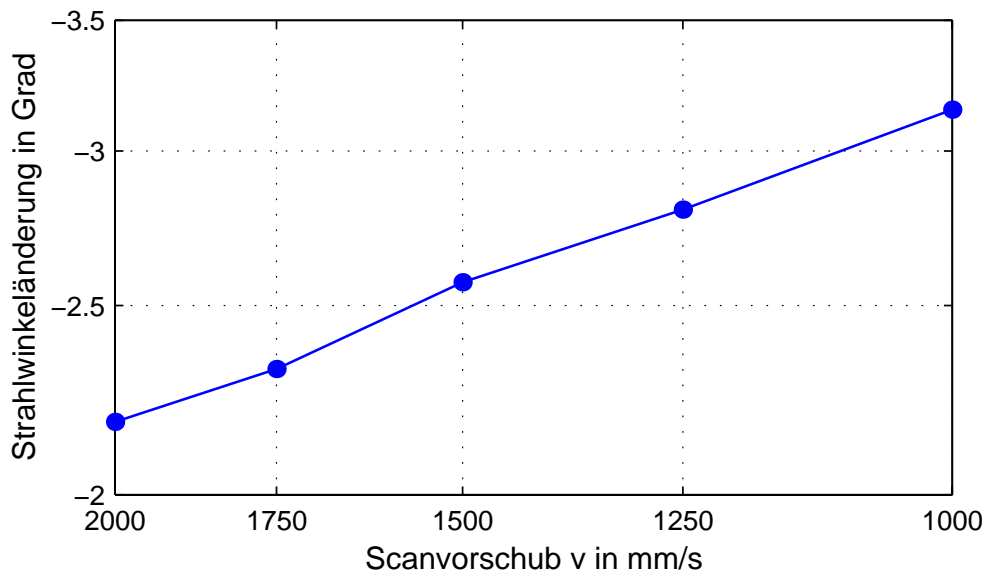


Abb. 8.3: Änderung des Strahlwinkels in Abhängigkeit der Scanvorschubgeschwindigkeit (Die eingezeichneten Messpunkte stellen jeweils den Mittelwert von 10 Bohrungen dar)

8.2 Laserspanentgraten von Fräsgraten

Bei der in diesem Abschnitt beschriebenen Entgrataufgabe müssen Fräsgrate entfernt und Kantenmaße in der Größenordnung von 300 bis 400 μm erzielt werden. Das Werkstück besteht aus dem oxidierbaren Stahl 16 MnCr 5. Die zu entgratende Kante hat die Geometrie einer 12,5 mm langen Geraden, so dass aufgrund der einfachen Kantengeometrie konturentgratet werden kann. Hinsichtlich der Wärmebeeinflussung durch das Laserentgraten gibt es keine Restriktionen, weil das Werkstück in nachfolgenden Fertigungsschritten gehärtet wird. Als Prozessmechanismus eignet sich aufgrund der hohen erzielbaren Abtragsrate das Laserspanen.

Da zum Laserspanen nur geringe Intensitäten erforderlich sind, wird ein cw-Laserstrahl der Wellenlänge $\lambda = 1064\text{ nm}$ eingesetzt. Die querschnittsbezogene Spanform und somit auch das resultierende Kantenprofil orientiert sich am erzeugten Temperaturprofil im Werkstück. Deswegen wird der Laserstrahl mit seiner Strahlachse versetzt gegenüber der Kante auf die anliegende Oberfläche positioniert. Bei festem Fokusbereich kann anhand der Fokusbereich der Strahldurchmesser d_w in der Wirkstelle variiert werden. Das sich ergebende laterale Kantenmaß a_x wird maßgeblich durch die Strahlpositionierung x und den Strahldurchmesser d_w beeinflusst. Die Intensität und der Vorschub sind so aufeinander abzustimmen, dass bei ausreichender Spandicke eine sichere Spanablösung erfolgt. Aus Abbildung 8.4a sind die eingestellten Prozessparameter zu entnehmen. Abbildung 8.4b zeigt den sich während des Prozesses ablösenden Oxidspan.

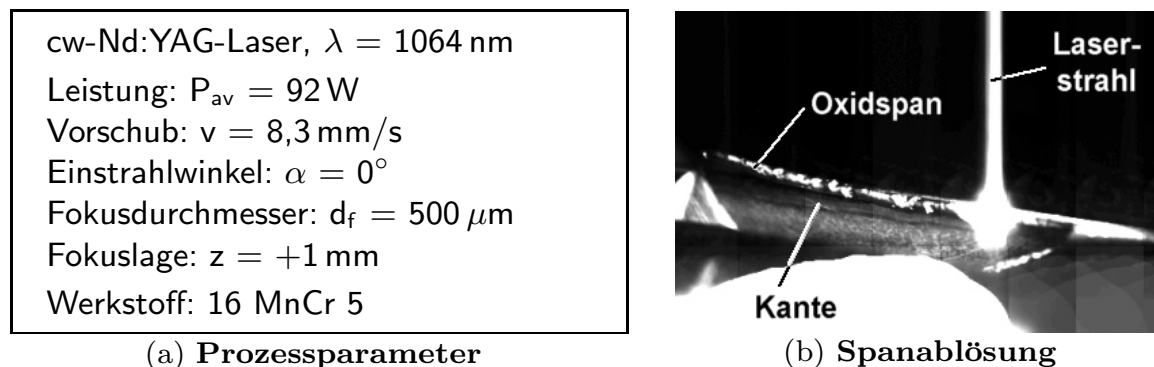


Abb. 8.4: Prozessdaten zum Laserspanentgraten eines Fräsgrates

Aufgrund der zum sicheren Prozessablauf notwendigen selbstständigen Spanablösung kann die Spandicke nur begrenzt variiert werden. Im hier betrachteten Fall lässt sich eine Spandicke von maximal 100 μm und minimal 20 μm realisieren. Deswegen wird, um das geforderte Kantenmaß a_z im Bereich von 300 bis 400 μm zu erzielen, in vier Bearbeitungsschritten entgratet. Anhand der Bearbeitungsschritte (Scans) wird nicht nur das Kantenmaß a_z sondern

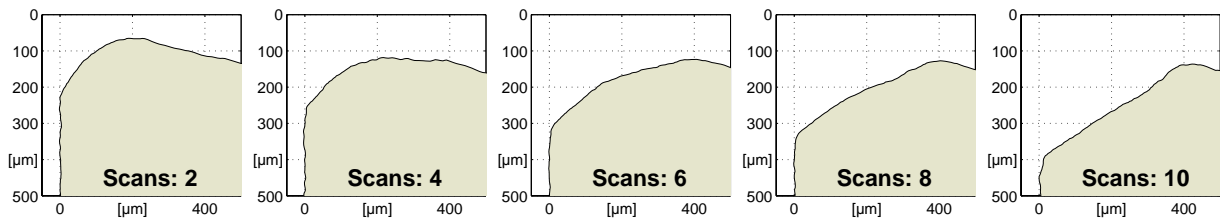


Abb. 8.5: Einfluss der Bearbeitungsschritte beim Laserspanen auf das Kantenprofil

Darstellung: Kantenmaß a_x auf der X-Achse, Kantenmaß a_z auf der Y-Achse. Prozessparameter: Strahldurchmesser $d_f=200\text{ }\mu\text{m}$, Fokusslage $z=+7\text{ mm}$, Leistung $P_{av} \approx 52\text{ W}$, Vorschub $v=10\text{ mm/s}$

auch maßgeblich die Kantenform beeinflusst, was der Vergleich der Kantenprofile in Abbildung 8.5 qualitativ zeigt.

Zur Abschätzung der Prozessstreuung sind in Abbildung 8.6 die erzeugten Kantenmaße von siebzehn Bauteilkanten, die jeweils mit den gleichen Parametern entgratet wurden, gegenübergestellt. Die Standardabweichung des Kantenmaßes a_z beträgt bezogen auf den Mittelwert ungefähr 4,4 %. Diese Streuung ist insbesondere auf Toleranzen in der Positionierung der Strahlachse zur Kante sowie ungleichmäßige Gratgrößen zurückzuführen. Davon ausgehend, dass bei konstanter Strahl- und exothermer Verbrennungsenergie stets eine konstante Menge des Werkstoffs aufgeschmolzen und oxidiert wird, wirkt sich das Gratvolumen direkt auf den Kantenabtrag aus. Ohne das abgetragene Gratvolumen zu berücksichtigen, wurde in den Versuchen bezogen auf die erzeugte Kantenverrundung eine mittlere Abtragrate von $8,5\text{ mm}^3/\text{min}$ erzielt.

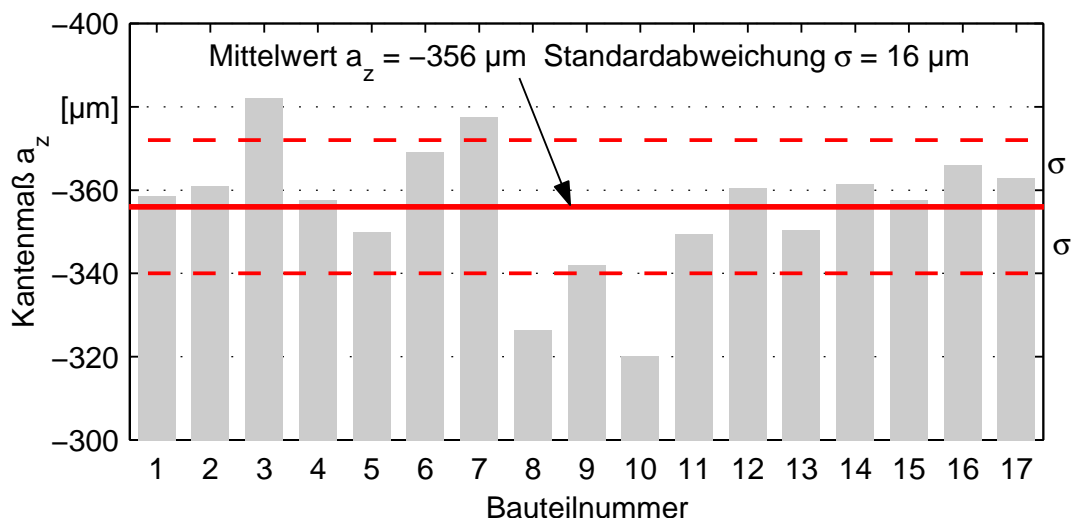
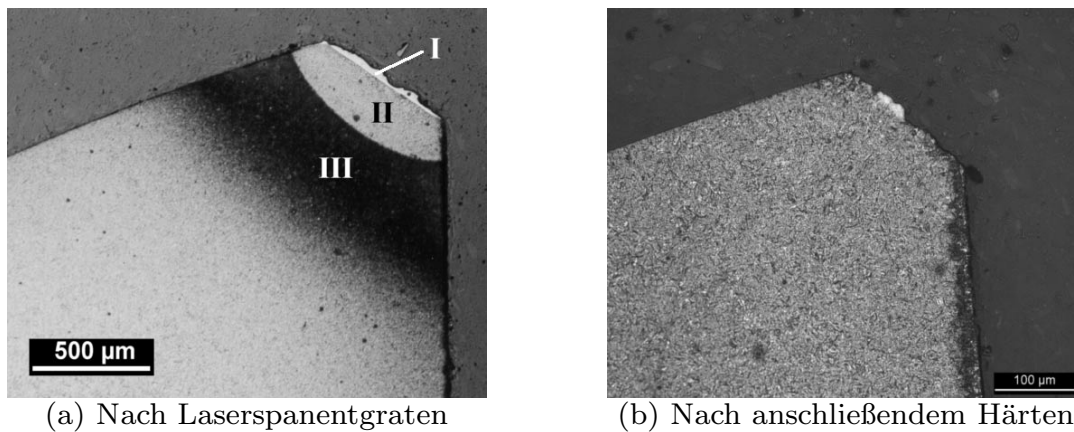


Abb. 8.6: Streuung gemessener Kantenmaße a_z (Prozessparameter nach Abb. 8.4a)



(a) Nach Laserspanentgraten

(b) Nach anschließendem Härten

Abb. 8.7: Durch das Laserspanentgraten erzeugte Wärmeeinflusszone (Werkstoff 16 MnCr 5)

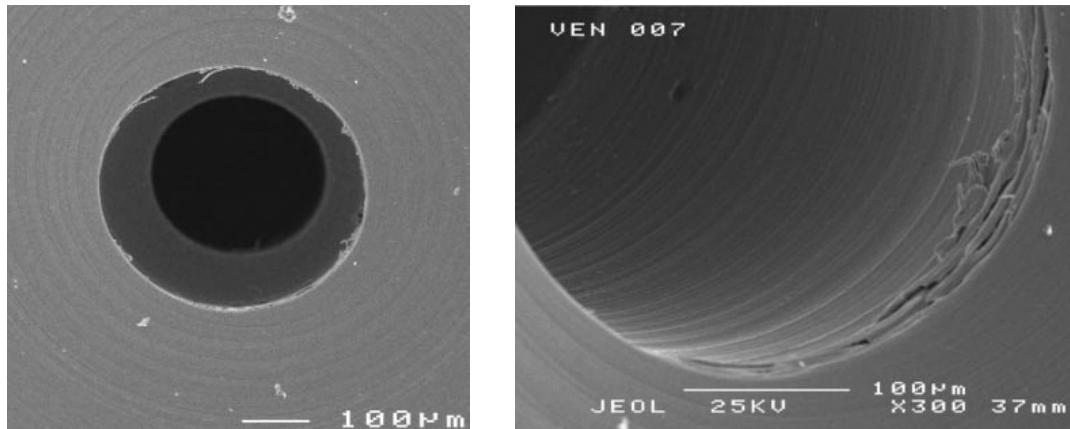
Durch das Laserspanen wird im Werkstoffgefüge eine ausgeprägte Wärmeeinflusszone erzeugt, die in Abbildung 8.7a beispielhaft dargestellt ist. Zu erkennen ist eine 20 bis 30 μm dicke wiedererstarrte Schmelzschicht (I), eine ungefähr 170 μm breite Neuhärte- (II) und eine ungefähr 400 μm breite Anlasszone (III). Durch eine anschließende Wärmebehandlung kann das Gefüge aber wieder umgewandelt und somit die Wärmeeinflusszone, die durch das Laserentgraten erzeugt wurde, rückgängig gemacht werden. Dieses zeigt das Schliffbild einer laserspanentgrateten Kante nach erfolgreichem Härten und Schleifen in Abbildung 8.7b.

8.3 Feinentgraten durch automatisiertes Mikroabtragen

Die im Folgenden beschriebene Verfahrensentwicklung hat zum Ziel, feine Schleifgrate von einer Bohrungskante an einem Ventilsitz zu entfernen und diese Kante zu verrunden. An der Bohrung anhaftende Grate sind in Abbildung 8.8 gezeigt. Der Bohrungsdurchmesser liegt im Bereich von 400 μm und die Entgrataufgabe wird durch folgende Forderungen charakterisiert:

- Eine große Wärmeeinflusszone im Kantenbereich ist aus Festigkeitsgründen unzulässig.
- Die anliegende Sitzfläche darf nicht beschädigt werden.
- Die zu erzeugende Kantenverrundung muss über den Bohrungsumfang gleichmäßig sein.

Wegen der geforderten kleinen Wärmeeinflusszone ist hinsichtlich des Prozessmechanismus nur das Entgraten durch Mikroabtragen möglich. Bei dieser Verfahrensvariante wird die Wärmeeinflusszone durch hohe Intensitäten



(a) Gesamtansicht der Bohrung (senkrecht von oben)

(b) Detailaufnahme des Grates in der Seitenansicht

Abb. 8.8: REM-Aufnahmen von Flittergraten an einer Ventilsitzkante

klein gehalten. Die Intensität darf aber auch nicht zu hoch gewählt werden, weil dann Aufwürfe entstünden, die eine Beschädigung der Sitzfläche darstellen.

Gegenüber dem Entgraten durch Umschmelzen und Laserspanen spielt beim Mikroabtragentgraten die Wärmeleitung im Grat und Kantenbereich keine entscheidende Rolle. Daraus ergibt sich zunächst, dass die Kante kontur-entgratet werden muss. Für eine gleichmäßige Verrundung über den Bohrungsumfang ist die genaue Positionierung des Laserstrahls im Verhältnis zur Kante erforderlich. Weil das laterale Kantenmaß a_x zwischen 30 und 40 μm betragen soll, ist eine Positioniergenauigkeit von mindestens 10 μm einzuhalten. Aufgrund von Lagetoleranzen der Bohrungsachse muss deswegen ein automatisiertes System zur Positionierung des Laserstrahls eingesetzt werden, welches in Abschnitt 8.3.2 beschrieben wird.

8.3.1 Verfahrensgestaltung

Die Menge der eingekoppelten Energie hängt stark vom Überlapp zwischen Laserstrahl und Kante bzw. Grat ab. Abbildung 8.9 zeigt schematisch, wie sich ein Positioniersversatz des Laserstrahls zur Kante als auch anhaftender Grat auf den Abtragprozess auswirkt. Ausgehend vom Idealfall, für den die Strahlintensität so eingestellt wird, dass nur ein minimaler Abtrag bei tollerbarer Aufwurfbildung entsteht, ergibt sich in den beiden anderen Fällen ein verstärkter Abtrag, der eine Aufwurfbildung mit sich zieht. Um die Ventilsitzfläche nicht durch diese Aufwürfe zu beschädigen, darf der Überlapp zwischen Strahl und Kante nicht zu groß werden.

Bei geringer Intensität kann mit einem Bearbeitungsschritt für die vorliegende Anwendung keine Gratfreiheit erzielt werden. Weil somit mehrere Bear-

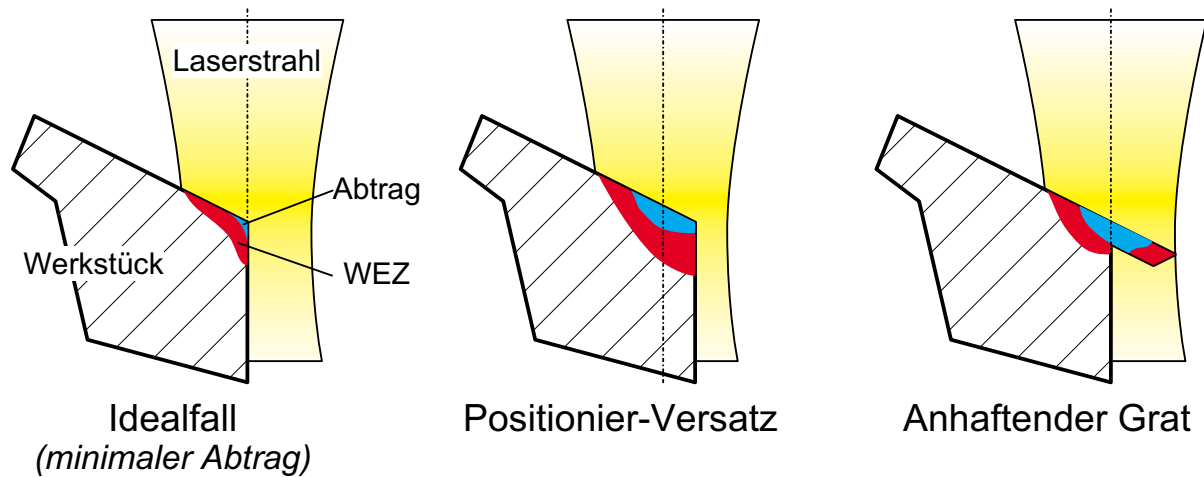


Abb. 8.9: Qualitative Auswirkung unterschiedlicher Überlappung zwischen Laserstrahlung und Werkstoff auf den Entgratprozess

beitungsschritte notwendig sind, kann die Problematik der unterschiedlichen Überlappung dadurch gelöst werden, dass die Strahlposition über die Anzahl der Bearbeitungsschritte variiert wird (Abbildung 8.10). Beginnend mit dem Durchmesser D_I , der kleiner als der Bohrungsdurchmesser D_B ist, wird der Laserstrahl in n Umdrehungen spiralförmig auf den Durchmesser D_A bewegt. Der innere Durchmesser D_I ist so zu wählen, dass der erste Puls noch nicht auf die Kante oder den Grat trifft. Da bei Q-Switch-Lasersystemen der erste Puls eine wesentlich höhere Pulsenergie als die folgenden Pulse einer Pulsfolge hat, wird so gewährleistet, dass die Kante nur mit Pulsen gleicher Pulsenergie bearbeitet und eine gleichmäßige Kantenverrundung ermöglicht wird. Beim Spiralentgraten werden zunächst die Grate angeschmolzen und

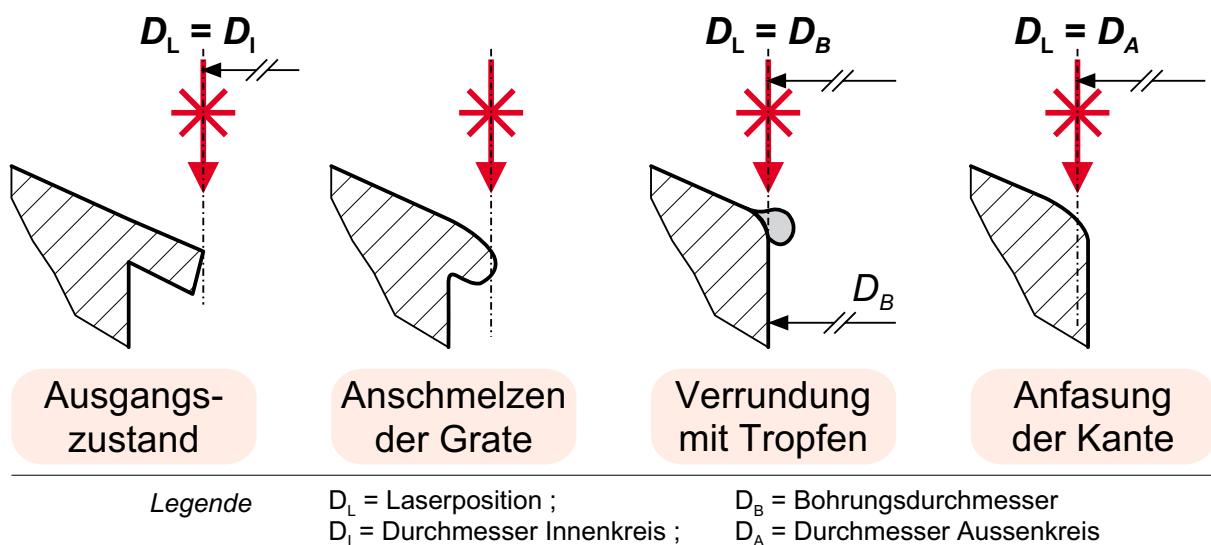
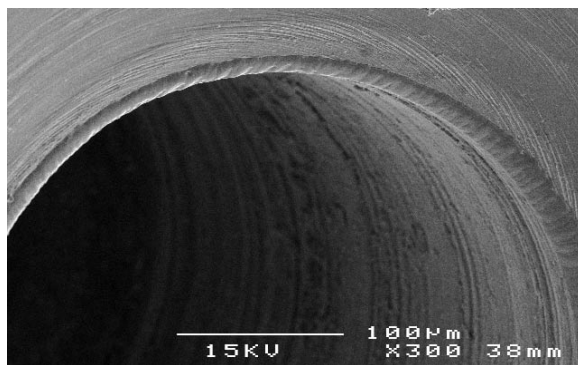


Abb. 8.10: Spiralentgraten – Variation der Strahlpositionierung D_L im Verlauf des Entgratprozesses

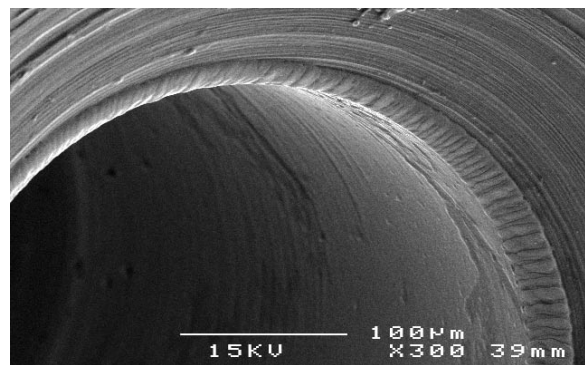
teilweise abgetragen. Kleine Schmelztropfen, die sich zwischenzeitlich an der Kante bilden können, werden in den nachfolgenden Bearbeitungsschritten abgetragen. Dazu sind nach Vorgabe der Intensität und des Vorschubs entsprechend viele Bearbeitungsschritte zu wählen, so dass die insgesamt eingebrachte Energiemenge ausreicht. Die Modellvorstellung des Prozessverlaufs beim Spiralentgraten ist in Abbildung 8.10 schematisch skizziert.

Abbildung 8.11 zeigt die resultierenden Kantenverrundungen für verschiedene Parametereinstellungen. Ausgehend von Typ A (Abb. 8.11a) wird durch eine Erhöhung der Intensität (Typ B, Abb. 8.11b) die Rauigkeit auf der angefasten Kantenflanke sichtbar stärker. Wird der Vorschub reduziert, so dass sich der Pulsüberlapp erhöht, dann heizt sich bei konstanter Intensität die Kante stärker auf. Bei Typ C (Abb. 8.11c) wurde gegenüber Typ A der Vorschub halbiert. Eine größere Verrundung ist zu erkennen. Für Typ D (Abb. 8.11d) wurde der Vorschub noch einmal halbiert und die Anzahl der Bearbeitungsschritte reduziert, so dass die Bearbeitungszeit gegenüber Typ



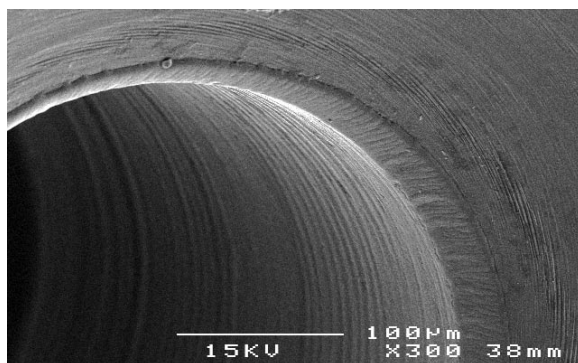
(a) **Typ A**

$I_m = 4,22 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$
 $v = 40,9 \text{ mm/s}$; $n = 156$
 $t_{\text{Prozess}} = 5,2 \text{ s}$



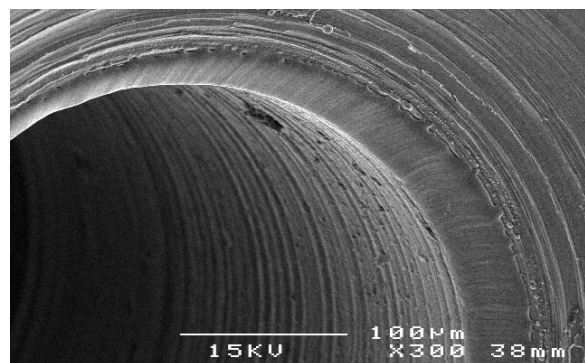
(b) **Typ B**

$I_m = 4,76 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$
 $v = 40,9 \text{ mm/s}$; $n = 156$
 $t_{\text{Prozess}} = 5,2 \text{ s}$



(c) **Typ C**

$I_m = 4,22 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$
 $v = 20,5 \text{ mm/s}$; $n = 156$
 $t_{\text{Prozess}} = 10,4 \text{ s}$



(d) **Typ D**

$I_m = 4,22 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$
 $v = 10,2 \text{ mm/s}$; $n = 75$
 $t_{\text{Prozess}} = 10,0 \text{ s}$

Abb. 8.11: Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf die Kantenverrundung der Ventilsitzkante (Fokusbereich $d_f = 40 \mu\text{m}$)

C nahezu konstant blieb. Trotz der somit insgesamt gleichen eingebrachten Energiemenge weist Typ D eine größere Verrundung auf. Der in Abbildung 8.11 an allen Kanten erkennbare Wulst zeigt sich auch im Schliffbild, dargestellt in Abbildung 8.12. Der Wulst hat eine Dicke von ungefähr $4\text{ }\mu\text{m}$ und ist als wiedererstarnte Schmelze zu interpretieren.

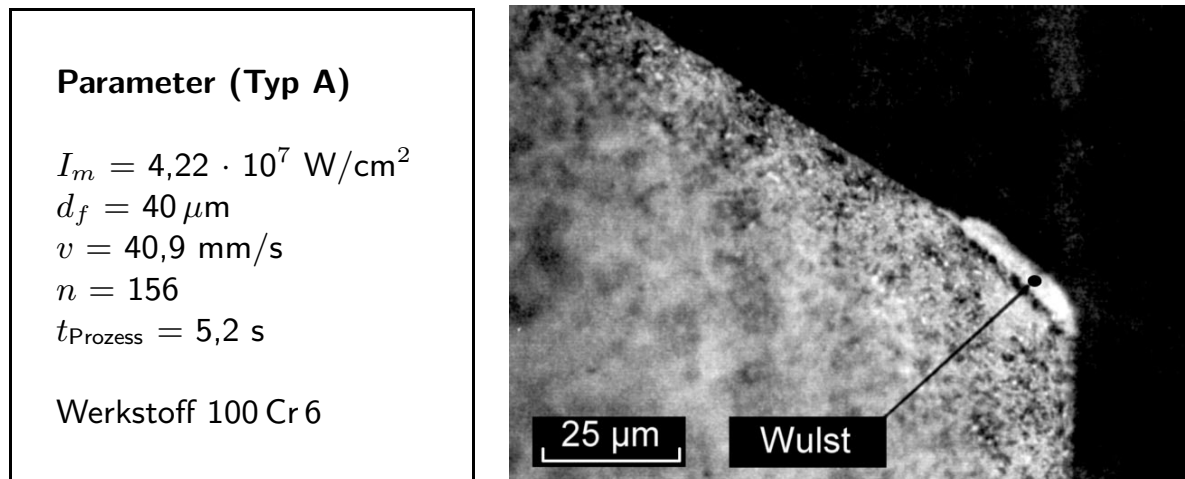


Abb. 8.12: Schliffbild der durch einen Mikroabtragprozess laserentgrateten Ventilsitzkante

Das Ziel, den Grat zu entfernen und die Sitzfläche nicht zu beschädigen, wird mit dem entwickelten Spiralentgraten erreicht. Allerdings unter der Einschränkung, dass die realisierte Kantenverrundung im Bereich von $5\text{ }\mu\text{m}$ kleiner als das geforderte Kantenmaß zwischen 30 bis $40\text{ }\mu\text{m}$ ist. Die erzielte Abtragrate kann anhand des Schliffbildes zwar nicht eindeutig bestimmt werden – zum einen liegt keine quantitative Information über das Gratvolumen vor, zum anderen ist durch den Wulst eine Volumenvergrößerung entstanden – doch ist sie als gering anzusehen. Durch eine Intensitätssteigerung kann der Abtrag verstärkt werden, doch steigt dann auch die Gefahr, dass durch ausgetriebene Schmelze die Sitzfläche beschädigt wird. Eine Kantenverrundung im Bereich zwischen 30 bis $40\text{ }\mu\text{m}$ zu erzielen, ohne die Sitzfläche durch Aufwürfe zu beschädigen und die Wärmeeinflusszone gering zu halten, kann mit den in dieser Arbeit aufgezeigten Laserentgratverfahren nicht realisiert werden.

8.3.2 Positionieren mit Bildverarbeitung

Hohe Bahngeschwindigkeiten, die zum Konturentgraten von kleinen Bohrungen erforderlich sind, können bei fixiertem Werkstück derzeit nur mit Spiegel-Scannern erreicht werden. Da die Wegmesssysteme der Scanner temperatur-empfindlich sind, unterliegt die Spiegelposition einer thermischen Drift. Die Genauigkeit der Laserstrahlpositionierung relativ zur Kante hängt von folgenden Faktoren ab:

- Thermische Drift des Scanners (bis $\approx 18 \mu\text{m}/6 \text{ h}$)
- Lagetoleranzen der Bohrung am Werkstück (ungefähr $20 \mu\text{m}$)
- Durchmesser-toleranzen der Bohrung (ungefähr $5 \mu\text{m}$)
- Zeigestabilität der Laserstrahlquelle (nicht quantifiziert)

Diese Toleranzen bewirken im Anwendungsfall der Ventilsitzkante, dass die erforderliche Positioniergenauigkeit zwischen Laserstrahl und Kante im Bereich von $5 \mu\text{m}$ ohne Maßnahmen zur Prozesssicherung nicht mehr erreicht wird.

Um die Lage des Laserstrahls zur Kante zu erfassen, wurde als off-line System (bezogen auf den Entgratprozess) ein digitales Bildverarbeitungssystem aufgebaut. Mit Hilfe einer Kamera wird die aktuelle Bearbeitungsstelle

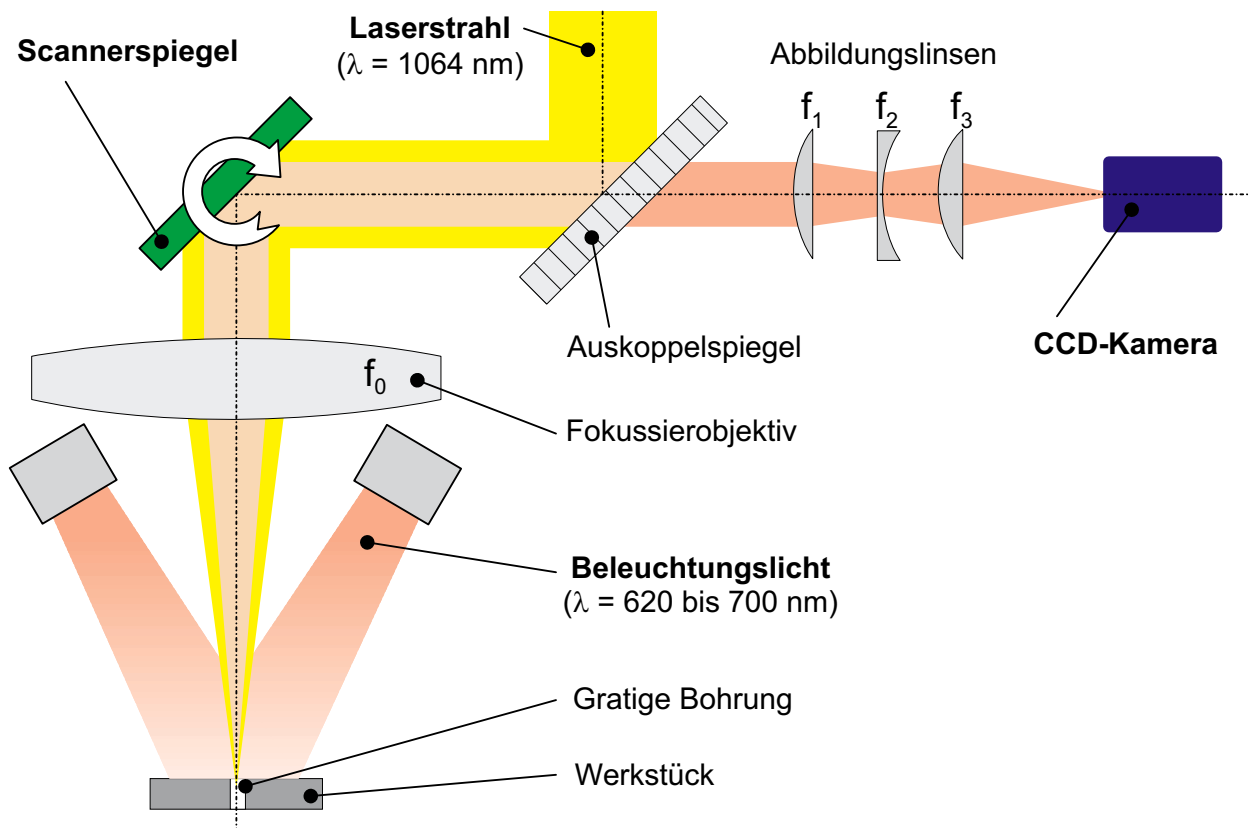


Abb. 8.13: Schematische Darstellung der Integration einer digitalen Kamera in den Strahlengang zur Aufnahme der Bearbeitungsstelle

aufgenommen, um dann durch Bildverarbeitungsalgorithmen die Lage der Kante automatisiert zu ermitteln. Abbildung 8.13 zeigt die Integration der Kamera in den Strahlengang. Da dieser die beweglichen Scannerspiegel, die der Temperaturdrift des Scanners unterliegen, umfasst, wird die Auswirkung der Spiegelstellung auf die Laserstrahlposition berücksichtigt.

Das an der Bearbeitungsstelle reflektierte Licht wird über das Fokussierobjektiv, die Scannerspiegel, den Auskoppelspiegel (der nur die Laserwel-

lenlänge von $\lambda = 1064 \text{ nm}$ reflektiert) und die Abbildungslinsen auf die CCD-Kamera geführt. Da die optischen Elemente im Strahlengang verschiedene Wellenlängen unterschiedlich abbilden, eignet sich der Einsatz einer schmalbandigen Beleuchtungsquelle, um eine hohe Qualität des Kamerabildes bezüglich der Tiefenschärfe zu erreichen. Die eingesetzte CCD-Kamera ist für rotes Licht am empfindlichsten, deswegen wird eine rote LED-Beleuchtungsquelle eingesetzt. Anhand der Verhältnisse der Brennweiten des Fokussierobjektivs und der Abbildungslinsen kann der Vergrößerungsfaktor k wie folgt eingestellt und die Größe des Bildausschnitts auf der Kamera angepasst werden:

$$k = \frac{f_3}{f_0} \cdot \frac{f_1}{f_2} \quad (8.1)$$

Im hier erläuterten Anwendungsfall weisen die Werkstück- und Gratoberfläche optisch, bezogen auf das Kamerabild, keine Unterschiede auf. Deswegen können mit den Algorithmen der Bildauswertung derzeit keine Grate identifiziert werden. Unterschieden werden kann nur zwischen der Werkstückoberfläche inklusive der Grate und der sichtbaren Bohrung. Wie in Abbildung 8.14 skizziert, hängt der sichtbare Bohrungsdurchmesser D_m von dem realen Bohrungsdurchmesser D_0 und den nach innen anhaftenden Gratfahnen ab. Ob eine Veränderung des sichtbaren Durchmessers D_m durch die Toleranz des Bohrungsdurchmessers D_0 oder nach innen ragende Grate verursacht wird, kann somit durch die Bildverarbeitung nicht bestimmt werden. Bei der betrachteten Anwendung variiert die Gratlage nur geringfügig gegenüber der Gratgröße. Deswegen wird zur Positionierung des Laserstrahls zur Bohrungskante nur die Lage des Mittelpunkts P_m der sichtbaren Bohrung berücksichtigt.

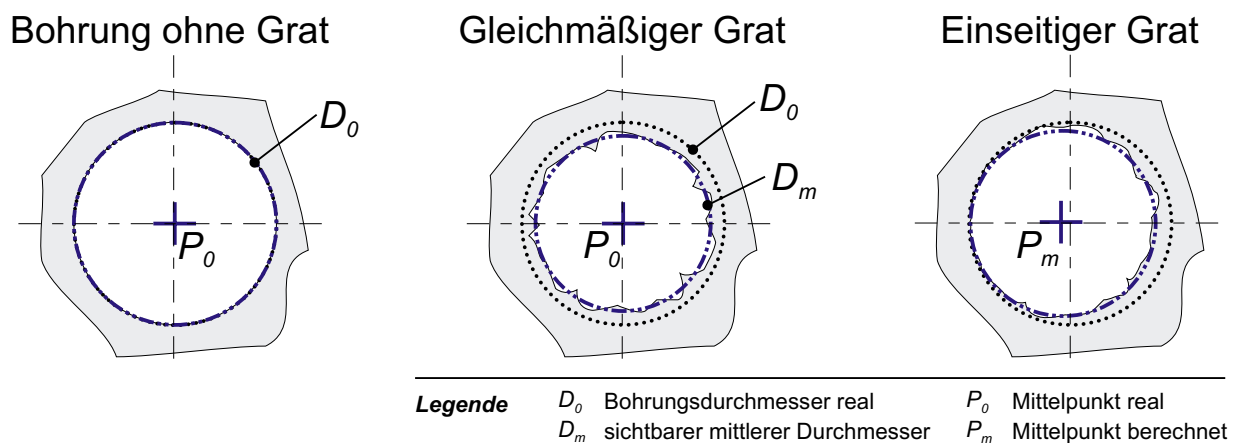


Abb. 8.14: Auswirkung der Gratgröße und -lage auf das Ergebnis der Bildverarbeitung bei der Ermittlung der Bohrungslage

Die Mittelpunktswkoordinaten des sichtbaren Durchmessers werden mit den Koordinaten des Referenzpunktes des Laserfokus verglichen und so Positionskorrekturwerte für die Scannerspiegel berechnet. Durch die Korrektur der Spiegelposition wird erreicht, dass Laserfokus und Bohrungsmittle in einem Punkt liegen. Anhand dieser Position wird der Entgratprozess gestartet indem die Bohrungskante in der Art und Weise abgefahren wird, die im vorherigen Abschnitt erläutert wurde.

Die Genauigkeit des Gesamtsystems der automatisierten Positionierung hängt prinzipiell von den einzelnen Komponenten ab:

- Gratlage und -größe
- Lichtreflexion an der Oberfläche im Bearbeitungsbereich
- Bildverarbeitung
 - Tiefenschärfe des Kamerabildes
 - Auflösung der Kamera (Pixel pro Mikrometer)
 - Algorithmen der Bildverarbeitung
- Toleranz bei der Ermittlung des Laserfokus-Referenzpunktes

Hinsichtlich der Bildverarbeitung konnte eine Toleranz von $\pm 3 \mu\text{m}$ realisiert werden. Über die Bildverarbeitung kann auch der Referenzpunkt des Laserfokus mit dieser Genauigkeit bestimmt werden. Da sich eine fehlerhafte Position des Referenzpunktes als Offset auswirkt, ist es möglich, die Referenzpunktllage statistisch zu korrigieren. Insgesamt wurde für den dargestellten Aufbau eine Genauigkeit im Bereich von $\pm 5 \mu\text{m}$ erreicht.

8.4 Zusammenfassung

Anhand der Anwendungsbeispiele konnte die Einsatztauglichkeit des Laserentgratens gezeigt werden. Sowohl mit Umschmelz- als auch Laserspan- und Mikroabtragverfahren können Grate entfernt und Kanten verrundet werden. In Tabelle 8.2 werden die Ergebnisse der Verfahren gegenübergestellt. Je nach Laserentgratverfahren lassen sich unterschiedlich hohe Abtragraten erzielen. Bei den Abtragraten ist jedoch zu beachten, dass das Gratlumen nicht mit berücksichtigt wurde.

Die Positionierung des Strahls zur Kante ist ein wichtiger Einflussparameter auf das Entgratergebnis. Für Entgratanwendungen, bei denen mit kleinen Laserfoki konturentgratet werden soll, sind automatische Positioniereinrichtungen, beispielsweise auf Basis der Bildverarbeitung, notwendig.

	Umschmelzen	Laserspanen	Mikroabtragen
Werkstoff	X5 CrNi 18 10	16 MnCr 5	100 Cr 6
Grattyp	Stanzgrat	Fräsgrat	Schleifgrat
Kantenwinkel	70 – 110°	87°	120°
Strategie	Scanentgraten	Konturentgraten	Spiralentgraten
Achssystem	Scanner	NC-Achsen	Scanner
Kantenform	verrundet	angefast	scharfkantig
Kantenmaß ^{a)}	10 – 20 μm	$\approx 350 \mu\text{m}$	$\approx 5 \mu\text{m}$
WEZ	10 μm	400 μm	4 μm
Prozesszeit			
t_{gesamt}	4 – 6 s	16 s	5 – 10 s
$t \text{ pro mm } ^b)$	1,3 – 1,6 s	0,6 s	3,0 – 8,0 s
Abtragate ^{c)}	—	8,5 mm ³ /min	$< 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{min}$

^{a)} Inneres Kantenmaß a_i

^{b)} Zeit pro Millimeter Kantenlänge

^{c)} Ohne Berücksichtigung des Gratvolumens

Tab. 8.2: Vergleich der realisierten Verfahren zum Laserentgraten

Kapitel 9

Einordnung und Bewertung des Laserentgratens

Zwei Aspekte bestimmen den erfolgreichen Einsatz eines Entgratverfahrens in der Fertigung:

- **Technologie** – mit dem Entgratverfahren kann der Grat sicher entfernt und gegebenenfalls die Kante verrundet werden, wobei die technologischen Randbedingungen der Entgrataufgabe, wie beispielsweise Maßhaltigkeit und Verzugsfreiheit, eingehalten werden.
- **Wirtschaftlichkeit** – für die Entgratkosten ist neben den direkten Prozesskosten auch der Aufwand für eine eventuelle Vor- und Nachbehandlung zu berücksichtigen. Je nach Integration eines Entgratverfahrens in die Fertigung wird der Fertigungsablauf beeinflusst, was sich wiederum auf die Fertigungskosten insgesamt auswirkt.

Den übergeordneten Gesichtspunkt zur Verfahrensbeurteilung stellt in der Fertigung die Wirtschaftlichkeit eines Entgratverfahrens dar. Da sich die Wirtschaftlichkeit nicht nur aus den direkten Prozesskosten, sondern auch aus den Ausschussteilen ergibt, ist es primär erforderlich, dass ein Entgratverfahren die geforderte Entgratqualität prozesssicher gewährleistet. Im folgenden Abschnitt 9.1 werden deswegen zunächst die technologischen Eigenschaften ausgewählter Entgratverfahren verglichen. Anschließend wird in Abschnitt 9.2 mit einer vereinfachten Kostenrechnung der Kostenaufwand für Laserentgraten abgeschätzt.

9.1 Vergleich zu konkurrierenden Entgratverfahren

In Tabelle 9.1 sind ausgewählte Entgratverfahren, die zum Entgraten feinwerktechnischer Anwendungen eingesetzt werden, mit ihren Merkmalen gegenübergestellt.

Das physikalische Wirkprinzip eines Entgratverfahrens bestimmt primär welche Grate entfernt und in welchem Maß Kanten verrundet werden können. Hinsichtlich der Gratgröße kann mit den Entgratverfahren, die in Tabelle 9.1 aufgeführt sind, hauptsächlich das Spektrum von Graten mit einer Gratfußdicke b_f kleiner als 0,3 mm entfernt werden. Der Wirkungsbereich eines Entgratverfahrens ist eine wesentliche Eigenschaft für den Einsatz, sowohl in technologischer als auch wirtschaftlicher Hinsicht. Die technologische Einsatzgrenze der ungezielt wirkenden Verfahren liegt darin, dass Eigenschaften des Gesamtbauteils wie beispielsweise Bauteilhärte oder Maßhaltigkeit beeinflusst werden können. Mit den gezielt wirkenden Entgratverfahren dagegen, zu denen auch das Laserentgraten zu zählen ist, können Kanten an einem Bauteil selektiv entgratet und je Kante ein optimales Entgratergebnis realisiert werden.

Nur bei Entgrataufgaben, deren technologische Randbedingungen den Einsatz jedes der Entgratverfahren zulassen, entscheiden allein die Kosten über die Verfahrensauswahl. Ob es wirtschaftlich günstiger ist, entweder mit einem ungezielt wirkenden Verfahren alle Kanten simultan oder mit einem gezielt wirkenden Verfahren die Kanten sequentiell zu entgraten, hängt maßgeblich von der Anzahl der zu bearbeitenden Kanten am Bauteil ab. Sind viele Kanten an einem Bauteil zu bearbeiten, kann mit den ungezielt wirkenden Verfahren wie beispielsweise Gleitschleifen oder TEM-Entgraten effizient entgratet werden. Abbildung 9.1 zeigt qualitativ den Einfluss der Anzahl zu entgratender Kanten auf die Entgratzeit eines Bauteils. Die Zeiten für das Laserspanentgraten wurden auf Basis der erzielbaren Abtragate abgeschätzt.

Beim gezielten Entgraten einer Kante hängen die Kosten maßgeblich von der Verfahrensgeschwindigkeit ab, die sich wiederum an der Abtragate orientiert. Dabei lässt sich allgemein aussagen, dass je Verfahren die erreichbare Präzision und die Abtragate umgekehrt voneinander abhängen [90, 97]. Bei allen Verfahren kann anhand der Prozessparameter die Abtragate und die Präzision in Grenzen variiert werden. Die maximal realisierbare Abtragate wird aber durch das Wirkprinzip eines Entgratverfahrens bestimmt.

Obwohl sich die einzelnen Entgratverfahren in ihren Wirkprinzipien unterscheiden, gibt es Überschneidungen ihrer Anwendungsbereiche [98]. Der Anwendungsbereich für Entgratverfahren soll hier qualitativ anhand der typi-

	Gleitschleifen	HDW*	ECM**	TEM***	Laserstrahl
Verfahrensart	mechanisch	mechanisch	elektro-chemisch	thermisch	thermisch
Physikalisches Wirkprinzip	Spanender Abtrag	Abschlagen und Strahlspanen	Abtragen durch anodische Auflösung	Umschmelzen und Oxidieren	Umschmelzen u. therm. Abtragen
Wirkbereich	ungezielt	gezielt	gezielt ⁺ , ungezielt ^o	ungezielt	gezielt
Max. Gratgröße	$b_f < 1,0 \text{ mm}$	k.A.	$b_f < 0,4 \text{ mm}^+$ $h_g < 1,0 \text{ mm}^+$	$b_f < 0,3 \text{ mm}$ $GO^{1)}/GV^{2)} > 10:1$	$b_f < 0,3 \text{ mm}$
Gratlage	bevorzugt außen	außen u. innen	außen u. innen	außen u. innen	bevorzugt außen
Metalle	alle – bei sehr hohen Gefahr des Gratumbiegens	duktilen Metal-	elek. leitfähig	oxidierbar	alle
Kantenverrundung	ja, $r_k < 0,2 \text{ mm}$	bedingt	ja ⁺ , $r_k < 1,0 \text{ mm}$	ja, $r_k < 0,5 \text{ mm}$	ja, $r_k < 0,5 \text{ mm}$
Prozesszeiten	mehrere Minuten	1 – 30 s	10 – 30 s	Taktzeit: 20 – 60 s	1 – 20 s
Prozessintegration	separate Anlage	bedingt möglich	separate Anlage	separate Anlage	möglich
Vorbehandlung	evt. Vorentgraten	keine	Oberflächen reinigen	Reinigen	evt. Entölen
Nachbehandlung	Trocknen	Trocknen	Neutralisieren und konservieren	Entfernen der Oxidschicht	evt. Waschen
Verfahrensgrenzen	Bauteilwandung stärker als Grate	Bauteilwandungen mind. 1 mm	Elektrodenform ⁺	Bauteilwandung stärker als Grate	Strahlführung
Mögliche Verfahrensfehler	Verklebungen von Chips, Schlagstellen an Bauteilen	Umbiegen der Grate	Erhöhung der Oberflächenrauigkeit, sog. „Gratabbildung“	Schmelztropfen bei langen Graten	Schmelzspritzer „Gratabbildung“
Besonderheiten		Kombination von Entgraten und Reinigen, Kaltverfestigung	Umweltaspekt: Hydroxidbildung, aufwendige Vorrichtungen ⁺	Beeinflussung d. Bauteilhärte im Kantenbereich	Neuhärtezone im Kantenbereich (minimal $2 \mu\text{m}$)

*) Hochdruck-Wasserstrahlentgraten

) Elektro-chemisches Formentgraten und Oberflächenpolieren: ^{+) gilt für Formentgraten} ^{o)} gilt für Oberflächenpolieren*) Thermisch-chemisches Entgraten: ¹⁾ GO=Gratoberfläche ²⁾ GV=Gratvolumen

Tab. 9.1: Vergleichsmatrix ausgewählter Entgratverfahren zum Entgraten von Feingraten (teilweise nach [5] u. [91])

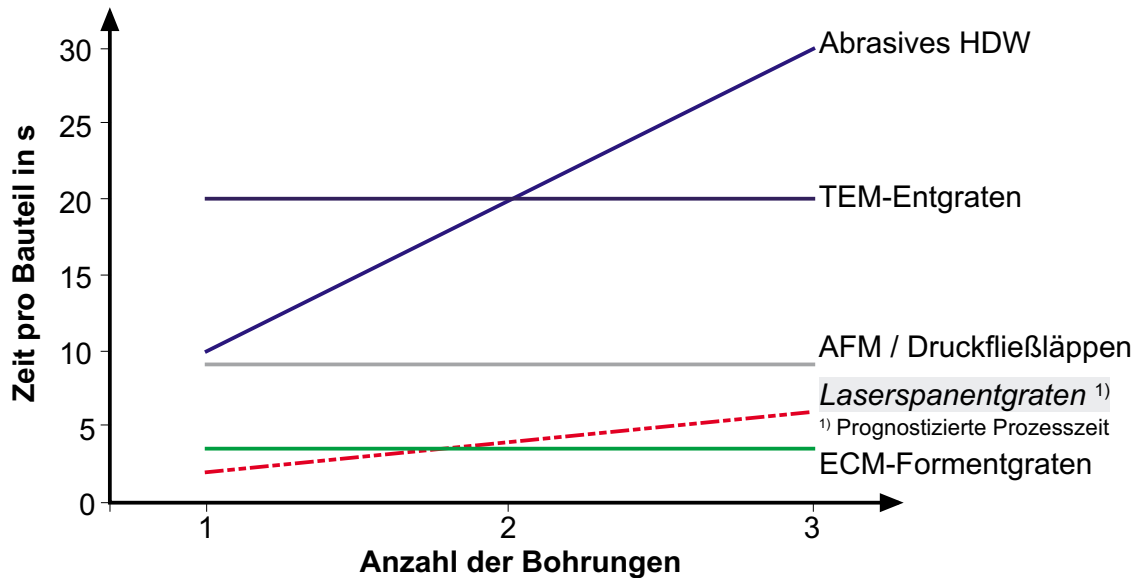


Abb. 9.1: Einfluss der Bohrungsanzahl eines Bauteils auf die Gesamtentgratzeit (Quelle für die Entgratzeiten pro Bohrung: Robert Bosch GmbH [92])

schen Verfahrensgeschwindigkeit bzw. Abtragrate und der Gratgröße eingegrenzt werden. An den aus der Fertigung bekannten Entgrataufgaben zeigt sich, dass sich die zu erzielende Kantenverrundung eines Entgratverfahrens an der Gratgröße orientiert. Je größer der zu entfernende Grat ist, desto größer ist in der Regel auch das geforderte Kantenmaß nach dem Entgraten. Da für die Darstellung der Anwendungsbereiche ausgewählter Entgratverfahren in Abbildung 9.2 die technologischen Randbedingungen der Verfahren nicht berücksichtigt werden, kann das Diagramm nicht zur Verfahrensauswahl für eine Entgrataufgabe dienen. Vielmehr zeigt es, zu welchen konventionellen Verfahren das Laserentgraten in Konkurrenz steht. Dabei lässt sich das Laserentgraten in zwei Anwendungsbereiche aufteilen, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

9.1.1 Laserspanentgraten

Das Laserspanentgraten eignet sich zum Entfernen von Massiv- und Feingraten, wenn als Entgratergebnis nicht nur Gratfreiheit, sondern auch eine Kantenverrundung im Bereich zwischen $50\ \mu\text{m}$ und $500\ \mu\text{m}$ zu erzeugen ist. In diesem Anwendungsbereich werden in der Fertigung derzeit bevorzugt Gleitschleifen, TEM-Entgraten und ECM-Formentgraten eingesetzt. In Tabelle 9.2 werden diese vier Verfahren bezogen auf die technologischen Aspekte verglichen.

Als gezielt wirkendes Verfahren steht Laserspanentgraten in erster Linie in

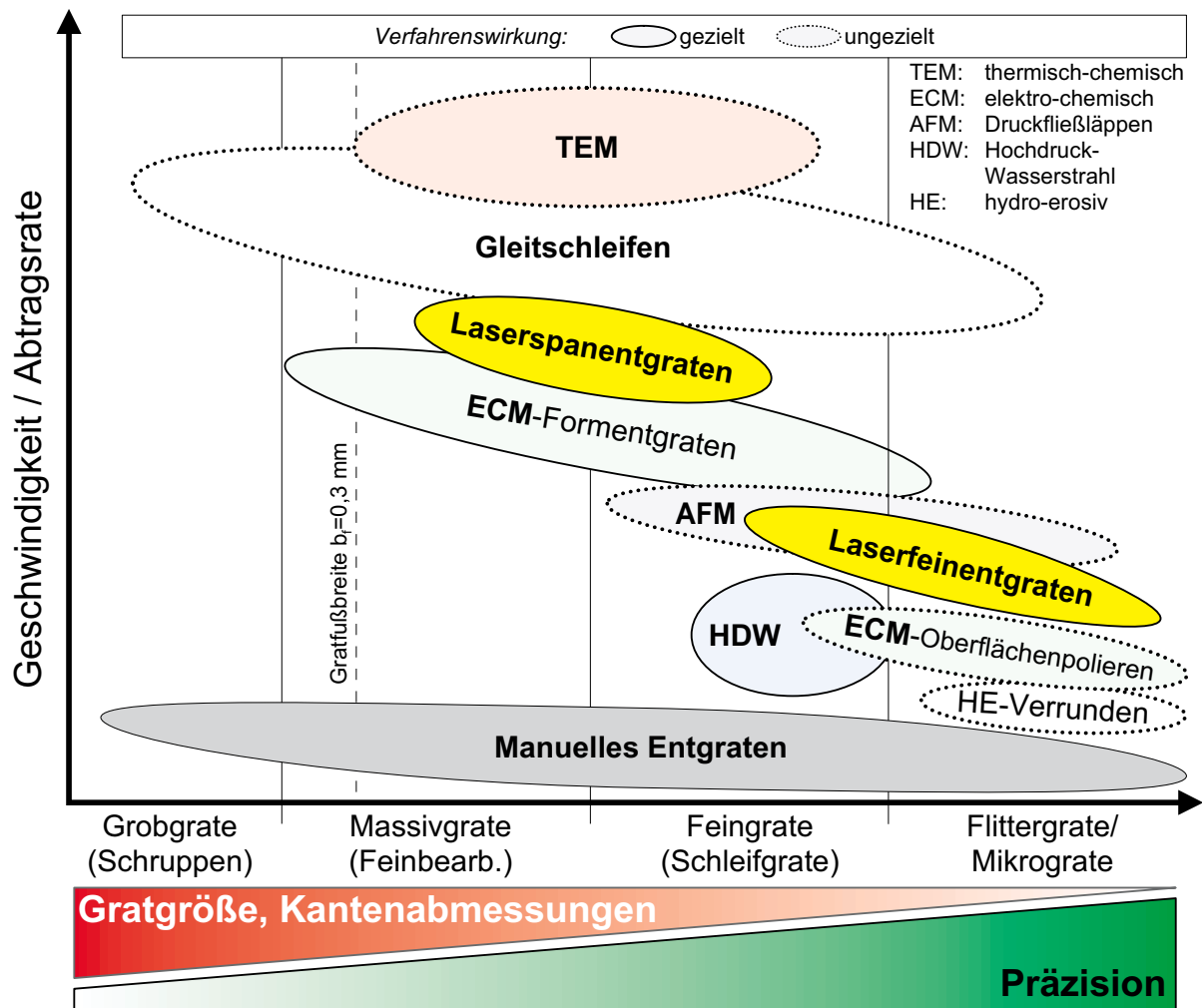


Abb. 9.2: Schematische Übersicht der Anwendungsschwerpunkte ausgewählter Verfahren zum Entgraten von Stahlwerkstoffen

Konkurrenz zum ECM-Formentgraten. Während mit dem ECM-Formentgraten mehrphasige, stark graphithaltige Gefüge (z.B. Grauguss mit Kugelgraphit) nicht zufriedenstellend entgratet werden können, lassen sie sich im Allgemeinen durch das Laserspanentgraten bearbeiten. Demgegenüber können hochlegierte, nicht oxidierbare Stähle im Gegensatz zum ECM-Formentgraten nicht bearbeitet werden.

Ein wesentlicher Unterschied beider Verfahren ist, dass durch Laserspanentgraten im Gegensatz zur ECM-Bearbeitung eine Wärmeeinflusszone an der Kante entsteht. Zwar spielt bei beiden Verfahren die Werkstoffhärte keine Rolle für den Abtragprozess an sich aber durch das Laserspanen wird die Bauteilhärte im Kantenbereich beeinflusst. So kann das Laserspanen nur bedingt zum Entgraten härter Bauteile eingesetzt werden.

Mit dem Laserspanentgraten lassen sich höhere Abtragsraten als beim ECM-Formentgraten erzielen¹. Sind an einem Werkstück mehrere Kanten zu ent-

¹Im Beispiel des Entgratens von Fräsgraten (siehe Abschnitt 8.2) liegt die Abtragsrate

	Stahl	Bauteil	Kanten	Entgratqualität	Fertigung
	Hartmetalle Duktile Metalle Härtbar Ferritisch Austenitisch Mehrphasige Legierung	Großserie Kleinserie Kleine Bauteile Große Bauteile	Viele Kanten Einzelkontur Außenkanten Innenkanten Kleine Bohrungen Komplexe Kantengeometrie	Aufwurf / Sekundärgrat Kein Bauteilverzug Maßhaltigkeit Oberflächenqualität Gleichmäßige Verrundung Kein Festigkeitsverlust	Vorbearbeitungsaufwand Prozessintegration Nachbearbeitungsaufwand Positionieraufwand Anlagenwartungsaufwand
Gleitschleifen	o - + + + +	+ o o o o	+ - + o - +	o + - + o +	+ - o + ?
TEM	+ + - + - +	o + - +	+ - + + o +	o - o o - o	- - - + ?
ECM-Formentgraten	+ + + + + -	+ - o +	o + + + o -	+ + + - - o	- o - - o
Laserspanen	+ + o + - +	+ + + +	- + + - + -	+ o + - o o	o + o - o

Legende: + = gut geeignet o = geeignet - = weniger geeignet

Tab. 9.2: Eignungsschwerpunkte des Laserspanentgratens im Vergleich zu konkurrierenden Entgratverfahren

graten, ist aber das ECM-Formentgraten besser geeignet, da durch simultanes Bearbeiten mit mehreren Elektroden die Gesamtbearbeitungszeit kurz gehalten werden kann. Beim Laserspanen ist dagegen ein simultanes Bearbeiten mit mehreren Laserstrahlen aufgrund der Strahlführung sehr aufwendig und daher in den meisten Fällen nicht praktikabel.

Umweltbezogen hat das Laserspanen gegenüber dem ECM-Formentgraten den Vorteil, dass keine giftigen Hydroxide anfallen und aufwendige Reinigungsverfahren nicht notwendig sind. Als Nachbearbeitung beim Laserspanentgraten kann unter Umständen ein Bürsten notwendig sein, um nicht selbstständig abgelöste Oxidspanreste von der Kante zu entfernen.

9.1.2 Laserfeinentgraten – Laserentgraten durch Umschmelzen und Mikroabtragen

Das Laserentgraten durch Umschmelzen und Mikroabtragen eignet sich aufgrund der geringen Abtragraten in erster Linie zum Entgraten kleiner Grate an Außenkanten und wird daher als Laserfeinentgraten bezeichnet. Als gezielt wirkendes Verfahren steht es primär in Konkurrenz zum Hochdruckwasserstrahlentgraten und eröffnet im Bereich des Entferns von Feinstgraten an Außenkanten gegenüber den ungezielt wirkenden Verfahren neue

beim Laserspanentgraten gegenüber dem ECM-Formentgraten ungefähr um den Faktor 3 bis 4 höher.

Möglichkeiten. In Tabelle 9.3 ist die Eignung der Verfahren zum Entgraten von Feingraten in einer Übersicht dargestellt. Das Laser-Umschmelzen (US) wurde gegenüber dem Laser-Mikroabtragen (MIC) als im Kantenbereich ungezielt wirkendes Verfahren bewertet.

	Stahl	Bauteil	Kanten	Entgratqualität	Fertigung
	Hartmetalle Duktile Metalle Härtbar Mehrphasige Legierung	Großserie Kleinserie Kleine Bauteile Große Bauteile	Viele Kanten Einzelkontur Außenkanten Innenkanten Kleine Bohrungen Komplexe Kantengeometrie	Aufwurf / Sekundärgrat Kein Bauteilverzug Maßhaltigkeit Oberflächenqualität Gleichmäßige Verrundung Kein Festigkeitsverlust	Vorbearbeitungsaufwand Prozessintegration Nachbearbeitungsaufwand Positionierungsaufwand Anlagenwartungsaufwand
HE-Verrunden	o o + +	+ + o +	+ o - + + +	+ + o + o +	+ - o o ?
ECM-Polieren	+ + + -	+ + + o	+ o + + + +	o + o o o o	- - - + ?
Druckfließläppen	+ + + +	+ o - +	+ - - + o +	+ + o + o +	+ - - o -
HDW	o - + +	+ - o +	- + o + - o	o + + o - +	+ o + - -
Laser-MIC	+ + + +	+ + + +	- + + - + -	o + + o + o	o + + - -
Laser-US	+ + o +	+ + + +	o + + o + o	o + + + o -	o + + + o

Legende: + = gut geeignet o = geeignet - = weniger geeignet

Tab. 9.3: Eignungsschwerpunkte des Laser-Mikroabtragens und -umschmelzens im Vergleich zu konkurrierenden Entgratverfahren

Zum Abtrennen von Graten und Erzeugen scharfer Kanten eignen sich vom Funktionsprinzip sowohl Laserentgraten durch Mikroabtragen als auch Hochdruckwasserstrahlentgraten. Je nach Verfahrensgestaltung können beim HDW die Grate abgeschlagen oder abgeschnitten werden. Beim Lasermikroabtragen werden die Grate ebenfalls abgeschnitten oder abgetragen. Die Gefahr, dass Grate nur umgebogen werden, besteht beim Lasermikroabtragen nicht. Wird abrasives HDW eingesetzt, um die Grate sicherer abzutrennen, dann ist eine genaue Positionierung des Wasserstrahls zum Grat wichtig, damit die angrenzenden Oberflächen nicht beschädigt werden. Dieses gilt ebenso für das Lasermikroabtragen, so dass hinsichtlich des Positionierungsaufwands keines der beiden Verfahren eindeutig Vorteile aufweist.

Aufgrund des mechanischen Wirkprinzips des HDW lassen sich harte Werkstoffe schlechter Entgraten als durch das thermisch wirkende Lasermikroabtragen. Kann die Wärmeeinflusszone des Lasermikroabtragens, die auf ungefähr $2\text{ }\mu\text{m}$ minimierbar ist, toleriert werden, dann ist es möglich beim Lasermikroabtragen höhere Verfahrensgeschwindigkeiten zu erzielen. Da beim HDW anwendungsspezifische Düsen benötigt werden, ist das Verfahren im

Gegensatz zum flexiblen Laserentgraten nur für Großserien wirtschaftlich einsetzbar.

Sind durch den Entgratprozess Kanten zu verrunden, dann eignet sich das umschmelzbasierte Laserentgraten. Durch das Umschmelzen einer gratigen Kante ohne Abtrag verbleibt allerdings ein kleiner Wulst bzw. ein Aufwurf an der Kante. Weil die Wärmeeinflusszone beim Umschmelzen größer als beim Lasermikroabtragen ist, eignet sich das Laserumschmelzentgraten nicht für mechanisch hochbelastete Kanten.

Für solche Entgrataufgaben ist eines der ungezielt wirkenden Verfahren einzusetzen. Die Verfahren HE-Verrunden und Druckfließläppen eignen sich nur für innenliegende Kanten und Durchflussbohrungen, so dass für außenliegende Kanten in erster Linie ECM-Polieren einzusetzen ist. Mit allen drei Verfahren lassen sich höchste Oberflächenqualitäten erzielen; allerdings werden die umliegenden Oberflächen beeinflusst. Mit dem Druckfließläppen lassen sich hohe Abtragraten und qualitativ gute Ergebnisse erzielen, doch ist das Verfahren anlagentechnisch aufwendig und kostenintensiv. Dies bezieht sich hauptsächlich auf das Reinigen der Bauteile von der Läpppaste.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich mit dem Laserumschmelzen und -mikroabtragen beim Entgraten einzelner Außenkanten gegenüber den konkurrierenden Entgratverfahren hohe Verfahrensgeschwindigkeiten erzielen lassen. Hinsichtlich der Oberflächenqualität werden aber nicht die geringen Rauigkeiten erzielt wie durch HE-Verrunden oder ECM-Polieren.

9.2 Kostenbetrachtung für Laserentgraten

Die Anlageninvestition und die Ausbringung einer Entgratanlage bilden die Basis einer Kostenaussage für das Laserentgraten. Da die Ausbringung von der Prozesszeit abhängt, die wiederum durch die jeweilige Entgrataufgabe bestimmt wird, sollen die Ausführungen auf die Anwendungen bezogen werden, die bereits im Abschnitt 8 erläutert wurden. Dazu zeigt Tabelle 9.4 eine Grobkostenrechnung für die bauteilbezogenen Abschreibungskosten einer Entgratanlage, wobei der Automatisierungsgrad der beschriebenen Anlagen gering gewählt wurde.

Die Investitionskosten für die Laserentgratanlagen umfassen jeweils die Größenordnung einer halben Millionen DM. Je nach Strahlquelle ergibt sich ein Anteil der laserspezifischen Kosten einer Entgratanlage im Bereich zwischen 15 und 25 %. Die Kosten für die Positionierung des Laserstrahls sind für den Einsatz eines NC-Achssystem oder eines Spiegelscanners gleich hoch. Zur Kostenermittlung der Grundanlage, die ein Grundgestell, eine Laserschutzkabine, eine manuelle Werkstückzufuhr sowie den mechanischen und

	Laserspanen <i>Fräsgrate</i>	Umschmelzen <i>Stanzgrate</i>	Mikroabtragen <i>Schleifgrate</i>
Laser	120.000 DM	50.000 DM	50.000 DM
Optik	20.000 DM	10.000 DM	10.000 DM
Positionierung	40.000 DM	40.000 DM	40.000 DM
Vorrichtungen	10.000 DM	10.000 DM	10.000 DM
Gasführung	10.000 DM	—	—
Grundanlage	177.000 DM	177.000 DM	177.000 DM
Steuerung	20.000 DM	15.000 DM	15.000 DM
Prozesssicherung	15.000 DM	5.000 DM	25.000 DM
Inbetriebnahme	75.000 DM	55.000 DM	85.000 DM
Anlageninvestition	487.000 DM	357.000 DM	407.000 DM
t_{Laser} / Teil	16 s	4 s	5–10 s
t_{neben} / Teil	4 s	—	1 s
Teile / Takt	6	1	1
$t_{\text{Werkstückwechsel}}$	10 s	1 s	2 s
Taktzeit	130 s	5 s	8–13 s
Arbeitszeit / d	24 h	24 h	24 h
Verfügbarkeit	95 %	97 %	95 %
Ausbringung / d	3784	16761	6292–10260
Abschreibung	5 y	5 y	5 y
Arbeitstage	230 d	230 d	230 d
Kosten pro Teil	11,19 Pf	1,85 Pf	3,45–5,62 Pf

Tab. 9.4: Abschätzung von Abschreibungskosten für Laserentgratanlagen geringen Automatisierungsgrads

elektrischen Aufbau als auch die Inbetriebnahme umfasst, wurde die Neukonstruktion einer Anlage zu Grunde gelegt. Beim Bau mehrerer Anlagen gleicher Bauweise, sinkt der Preis je Anlage. Je nach Einbindung einer Laserentgratanlage in den Fertigungsfluss ist eine Automatisierung der Werkstückzuführung erforderlich, welche die Anlagenkosten maßgeblich beeinflussen kann.

Die Investitionskosten für eine vom Automatisierungsgrad vergleichbare ECM-Entgratanlage liegen ebenfalls in der Größenordnung der Kosten für eine Laserspanentgratanlage. Somit kann derzeit weder dem ECM-Formentgraten noch dem Laserspanentgraten ein eindeutiger Kostenvorteil zugeordnet werden.

Kapitel 10

Zusammenfassung und Ausblick

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist es, Laserentgraten als fertigungseinsatzfähiges Verfahren zu entwickeln, um so Entgratqualität und Taktzeit gegenüber den konventionellen Entgratverfahren steigern zu können. Das Anwendungsspektrum soll dabei auf Stahlwerkstoffe beschränkt werden.

Das potenzielle Anwendungsspektrum für Laserentgraten leitet sich aus den Entgrataufgaben ab, bei denen mit den konventionellen Verfahren derzeit keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. So stehen für das Laserentgraten im Rahmen dieser Arbeit feinwerktechnische Anwendungen im Vordergrund, bei denen schwerpunktmäßig an Bohrungen mit Durchmessern von $250\text{ }\mu\text{m}$ bis 3 mm Feingrate zu entfernen sind. Das Entgratergebnis soll in erster Linie absolute Grاتفreiheit umfassen, so dass keine nachfolgenden Verfahren notwendig sind. Neben der Grاتفreiheit an sich sollen durch Laserentgraten sowohl scharfkantige als auch verrundete Kanten mit Kantenmaßen im Bereich von 10 bis $500\text{ }\mu\text{m}$ erzeugt werden können.

Um Grate mittels Laserstrahlung zu entfernen, können sie prinzipiell abgeschnitten, abgetragen oder umgeschmolzen werden. Dabei unterscheiden sich Abschneiden und Abtragen der Grate nur durch das Verhältnis der Größe der Wirkstelle zur Grathöhe. Somit ist hinsichtlich der Prozessmechanismen grundlegend zwischen Umschmelzen und Laserspanen mit Intensitäten unterhalb der Abtragschwelle sowie sublimationsbasiertem Mikroabtragen zu unterscheiden.

Das Abtragen der Grate durch Laserspanen kann nur bei oxidierbaren Stählen eingesetzt werden und ist besonders geeignet, wenn große Kantenverrundungen zu erzeugen sind. Das Umschmelzen der Grate eignet sich zum Verrun-

den von Kanten, wenn eine geringe Rauigkeit der Kantenverrundung erforderlich ist. Während bei kleinen Gratvolumen durch Umschmelzen eine gleichmäßige Verrundung realisiert werden kann, entstehen bei großen und unregelmäßigen Graten schwer entfernbare Schmelztropfen an der Kante. Mit Mikroabtragen können insbesondere Grate mit großer Grathöhe effizient entfernt und scharfkantige Kanten erzeugt werden. Zum Erzeugen großer Kantenverrundungen eignet sich das Mikroabtragen nur bedingt, da zum einen Schmelzaufwürfe gebildet werden und zum anderen die geringe Abtragrate lange Prozesszeiten bewirkt.

Bei den Prozessen mit geringer Intensität spielt die Wärmeleitung und damit die Geometrie des Grates und der Kante eine wichtige Rolle. Deswegen wirkt sich die Positionierung des Strahls zur Kante bei den wärmeleitungsbasierenden Verfahren prinzipiell nicht so stark aus wie beim Mikroabtragen. Ferner hängt von der Intensität die Größe der Wärmeeinflusszone ab. Während beim Laserspanen und Umschmelzen Wärmeeinflusszonen im Bereich bis zu $500\text{ }\mu\text{m}$ entstehen können, lassen sie sich durch Mikroabtragen bei Intensitäten bis 10^{12} W/cm^2 auf eine Dicke von ungefähr $2\text{ }\mu\text{m}$ minimieren.

Bei den in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsbeispielen konnten hinsichtlich der Entgratqualität zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Die Prozesszeiten liegen zwischen 4 bis 20 Sekunden und befinden sich damit im Bereich der gefordert ist, um Laserentgraten in getakteten Fertigungen einzusetzen. Während beim Scanentgraten eine ausreichende Wiederholbarkeit erreicht wird, bedarf es beim Konturentgraten steuerungstechnischer Maßnahmen für eine gleichbleibende Positionierung des Laserstrahls zur Kante. Dieses konnte im Rahmen dieser Arbeit durch ein Bildverarbeitungssystem realisiert werden, das eine Positioniergenauigkeit im Bereich von $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ ermöglicht.

Als gezielt wirkendes Entgratverfahren steht Laserspanentgraten in Konkurrenz zum ECM-Formentgraten. Bezogen auf die betrachtete Anwendung bietet das Laserspanentgraten bei vergleichbaren Anlagenkosten eine höhere Abtragrate. Generell ist anzumerken, dass beim Laserspanentgraten die Prozesszeit im Gegensatz zu ECM von der Kantenlänge abhängt. Umschmelzen und Mikroabtragen, zusammengefasst als Feinentgraten bezeichnet, stehen in Konkurrenz zum gezielt wirkenden Hochdruckwasserstrahlentgraten. Um Kanten von Bohrungen mit Durchmessern unter $300\text{ }\mu\text{m}$ zu verrunden, stellt das Laserfeinentgraten neben neuesten Entwicklungen beim ECM-Entgraten das einzige gezielt wirkende Entgratverfahren dar. Bezogen auf eine Bohrung liegen die erzielbaren Abtragraten höher als bei den ungezielt wirkenden Verfahren, demgegenüber ist die erreichbare Präzision derzeit geringer.

Das Einsatzpotenzial des Laserentgratens liegt beim Entgraten kleiner Geometrien bei denen bislang in erster Linie ungezielt wirkende Verfahren zum Einsatz kommen. Wurden mit der vorliegenden Arbeit Grundlagen für das

Laserfeinentgraten erarbeitet und anhand ausgewählter Anwendungen die Einsetzbarkeit des Verfahrens gezeigt, so gilt es für die Zukunft, die Prozesssicherheit und Präzision des Laserentgratens zu steigern. Kann dieses durch die Entwicklung von Prozesssicherungsmaßnahmen erreicht werden, wird sich das Laserentgraten in der Fertigung etablieren können.

Literaturverzeichnis

- [1] FRIEDRICH SCHÄFER: *Entgraten – Theorie, Verfahren, Anlagen*
Stuttgart, Otto Krausskopf Verlag, 1975
- [2] W. KÖNIG, W. SEVERT: *Grate vermeiden bei der Bohr- und Fräsbe-
arbeitung von Guss- und Stahlwerkstoffen*
Ölhydraulik und Pneumatik, Band 39 (1995) Heft 5, S. 405–409
- [3] K. BERGER: *Praxiserfahrungen und Trends beim Entgraten am Beispiel
eines Automobilherstellers*
Praxis-Forum, Oberflächentechnik, Band 15 (1997), S. 249–264
- [4] HANS-MICHAEL BEIER: *Handbuch Entgrattechnik*
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1999
- [5] BERND BRUDER: *Erstellung und Auswahlssystem zur gezielten Anwen-
dung von Entgratverfahren bei der Robert Bosch GmbH*
Diplomarbeit, IfW Uni Stuttgart, 1997
- [6] RAINER LINK: *Gratbildung und Strategien zur Gratreduzierung bei der
Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide*
Univ. Diss., RWTH Aachen, 1992
- [7] D. BOLEY, A. STOLZ: *Entgraten mit Industrierobotern*
VDI-Zeitung 130, Nr.2, S.23–28, 1989
- [8] ALFRED P. THILOW: *Thermische Entgratmethode und elektrochemi-
sches Formentgraten*
Praxis-Forum, Oberflächentechnik, Band 15 (1997), S. 57–77, Berlin
- [9] N.N.: *Die elektrochemische Metallbearbeitung von Bosch*
Firmenschrift, Robert Bosch GmbH, Geschäftsbereich Automations-
technik, 1999
- [10] N.N.: *Die Thermische Entgratmethode von Bosch*
Firmenschrift, Robert Bosch GmbH, Geschäftsbereich Automations-
technik, 1999

- [11] AXEL HENNING, KNUT KILLE: *Entgraten mit Hochdruckfluidstrahlen*
In: „Informationsmaterial zum Thema Wasserstrahltechnik“ FhG-IPA,
Stuttgart, 1996
- [12] A. HENNING: *Entgraten mit Hochdruckfluidstrahlen*
Praxis-Forum, Oberflächentechnik, (1996), S. 137–165
- [13] FRITZ ZELLER: *Rationelles Reinigen und Entgraten komplexer
Werkstücke mit wässrigen Medien*
Giesserei-Erfahrungsaustausch, Band 43 (1999) Heft 6, S. 272–274
- [14] M. SCHLATTER: *Entgraten durch Hochdruckwasserstrahlen*
Univ. Diss., Uni Stuttgart, Springer Verlag, 1986
- [15] DIN 8589, TEIL 17: *Gleitspanen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe*
Hrsg.: Deutscher Normenausschuß, Dezember 1985
- [16] DIN 6784: *Werkstückkanten*
Hrsg.: Deutscher Normenausschuß. Beuth, Berlin 1982
- [17] DIN 8580: *Fertigungsverfahren, Begriffe, Einteilungen*
Hrsg.: Deutscher Normenausschuß. Beuth, Berlin 1985
- [18] N.N.: *Abtragen, Bohren und Trennen mit Festkörperlaser*
Laser in der Materialbearbeitung; Band 7 (1999), Bearb.: H.-J. Schmitz,
VDI-Technologiezentrum, Düsseldorf, 1999
- [19] HELMUT HÜGEL: *Strahlwerkzeug Laser*
Teubner Verlag, Stuttgart, 1992
- [20] R. IFFLÄNDER: *Festkörperlaser für die Materialbearbeitung*
Springer Verlag, Berlin, 1990
- [21] DIETER BIMBERG: *Materialbearbeitung mit Lasern*
Kontakt & Studium Band 343, Expert Verlag, 1991
- [22] N.N.: *Laser und Laseranlagen – Begriffe und Formelzeichen*
DIN EN ISO 11145, November 1994
- [23] FRIEDRICH DAUSINGER: *Absorption von Laserstrahlung*
Kopien zur Vorlesung Mikrobearbeitung, SS 99, Uni-Stuttgart, 1999
- [24] W.W. DULEY: *CO₂-Lasers – Effects and Applications*
Academic Press, New York, 1976
- [25] H. S. CARSLAW, J. C. JAEGER: *Conduction of Heat in Solids*
2nd Edition, Oxford University Press, 1959
- [26] MARTIN VON ALLMEN, HANS PETER SCHWOB,: *Method for ablating
metal workpieces with laser radiation*
United States Patent 4.114.018, September 12, 1978
- [27] G. HERZIGER, R. WESTER, D. PETRING: *Abtragen mit Laserstrahlung*
Laser und Optoelektronik 23(4)/1991

- [28] R. WESTER: *Laserinduziertes Abdampfen als Basisprozess des Bohrens, Fräsens und Schneidens*
Laser und Optoelektronik 23(4), 60, 1991
- [29] J. ARNOLD, U. STARK, F. DAUSINGER: *Structuring of Metals by Ablation with Excimer Laser*
Proc. of ICALEO'91, 1991, S. 414–423
- [30] N.N.: *Abtragen, Bohren und Trennen mit Festkörperlasern*.
In: Laser in der Materialbearbeitung, Band 7, VDI Technologiezentrum
- [31] ROLAND MAYERHOFER: *Mikrobearbeitung mit KupferdampfLasern – Prozeßcharakterisierung und Werkstoffabhängigkeit des Abtrag*
Uni. Diss. Erlangen, 1997
- [32] GERT CALLIES: *Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen*
B.G. Teubner Stuttgart, Leipzig, 1999
- [33] AKIRA MATSUNAVA, NAOKI SETO, MASAMI MIZUTANI, SEIKI KATAYAMA: *Liquid Motion in Keyhole Laser Welding*
ICALEO 98, Section G, S. 151–159
- [34] RINA MURAYAMA, ETSUJI OHMURA, ISAMU MIYAMOTO: *Thermohydrodynamic Analysis for Bump Formation in Laser Texturing*
ICALEO 98, Section G, S. 33–42
- [35] MARTIN VON ALLMEN: *Laser-Beam Interactions with Materials*
Springer Series in Materials Sciences, Vol. 2, Springer, Berlin, 1987
- [36] E. MEINERS: *Untersuchungen zum Schmelzaustrieb beim Bohren mit Nd:YAG-Lasern*
Universität Stuttgart, Diplomarbeit, IFSW 89–18, 1989
- [37] C. KÖRNER, R. MAYERHOFER, M. HARTMANN, H.W. BERGMANN: *Physical and material aspects in using visible laser pulses of nanosecond duration for ablation*
Applied Physics A 63, 123 - 131 (1996)
- [38] ROLAND MAYERHOFER, MICHAEL WILFERT, MARTIN HARTMANN: *Grünes Licht für Materialbearbeitung – Werkstoffabtrag mit Hochleistungs-MetalldampfLasern*
Laser-Praxis, April 1998, Carl Hanser Verlag, München
- [39] JOHANNES ARNOLD: *Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit ExcimerLasern*
Uni. Diss. Stuttgart, Teubner Stuttgart, 1994
- [40] ANDREAS SCHÜSSLER: *Miniaturwelt – Nd:YAG Festkörperlaser schneiden und bohren im Mikrobereich*
Maschinenmarkt, Würzburg 100 (1994) 41

- [41] N. BLOEMBERGEN: *Laser-Material Interactions; Fundamentals and Applications*
Proc. of LAMP'92, Nagaoka (June 1992)
- [42] B.C. STUART, M.D. FEIT, A.M. RUBENCHIK: *Laser-Induced Damage in Dielectrics with Nanosecond to Subpicosecond Pulses*
Physical Review Letters, Vol. 74, No. 12, 20 March 1995
- [43] B.N. CHICHKOV, C. MOMMA: *Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids*
Applied Physics A 63, 109–115 (1996)
- [44] XINBING LIU, GÉRARD MOUROU: *Ultrashort laser pulses tackle precision machining*
Laser Fokus World, August 1997, S. 101–118
- [45] A. MENSCHIG, J. OBERFELL, H-E. SWOBODA: *Präzise Mikrofertigung – Feinstbearbeitung mit Piezotechnologie und ultrakurzen Laserpulsen*
Laser-Praxis, Heft 2 Oktober 1997, Carl Hanser Verlag, München
- [46] J. KRÜGER, W. KAUTEK: *Sub-picosecond-pulse laser machining of advanced materials*
In: Proceedings of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials, September 16-18 1996, Stuttgart. S. 691–698
- [47] U. FRANZ, A. EMSERMANN, K. REINHARDT, A. LUFT: *Nachweis und Vergleich der beim Bohren von Metallen mit Kurzpulslasern entstehenden Wärmeeinflußzonen*
In: Proceedings of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials, September 16-18 1996, Stuttgart. S. 715–722
- [48] A. LUFT, U. FRANZ, J. EMSERMANN, J. KASPAR: *A study of thermal and mechanical effects on materials induced by pulsed laser drilling*
Applied Physics A 63, S.93–101 (1996)
- [49] C. MOMMA, S. NOLTE, B.N. CHICHKOV, F. V. ALVENSLEBEN, A. TÜNNERMANN: *Precise laser ablation with ultrashort pulses*
Applied Surface Science 109/110 (1997), S.15–19
- [50] J. JANDELEIT, A. HORN, R. WEICHENHAIN, E.W. KREUTZ, R. POPRAWA: *Fundamental investigations of micromachining by nano- and picosecond laser radiation*
Applied Surface Science 127/129 (1998), S.885–891
- [51] DORIS SCHUBART: *Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung*
Meisenbach Verlag, Bamberg, 1999, ISBN 3-87525-122-9

- [52] G. EBERL, P. HILDEBRANDT, H. HÜGEL, E. MEINERS: *Laserspanen eine neue Technologie zum Abtragen*
Laser und Optoelektronik 25 (3), 1993
- [53] ULI SUTOR: *Formabtrag mit CO₂-Laserstrahlung*
D 82 (Diss. RWTH Aachen), Verlag Shaker, Aachen 1994
- [54] BIRGIT ANGSTENBERGER: *Reaktives Abtragen von Stahl mit cw-Nd:YAG-Festkörperlasern verschiedener Leistungsklassen*
Studienarbeit, Universität Stuttgart, IfSW 93–57, 1993
- [55] D. SCHUBART, F. VOLLERTSEN, M. KAUF: *Process Modelling of Laser Ablating Ferrous Materials*
In: Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 5 (1997), S.1–14
- [56] T. ABELN, J. RADKE, F. DAUSINGER, H. HÜGEL: *Micro Structuring of Ceramics and Steels with Solid-state Lasers*
In: Proceed. of the Europ. Conf. on Laser Treatment of Materials ECLAT'98, S.385–390, Hannover, 1998
- [57] MICHAEL KUHL: *Verfahren zum Abtragen mittels Laserstrahl*
Patentschrift DE 42 00 656 C1, Bundesdruckerei, 1993
- [58] RUTH WEICHENHAIN, WOLFGANG KREUTZ: *Strukturieren mit Laserstrahlung*
Laser-Praxis, April 1999, S.25–26
- [59] R. BROCKMANN, K. DICKMANN: *Feinbearbeitung mittels Nd:YAG-Laserbearbeitung*
Lasermarkt 1998, S.18–23
- [60] A. GILLNER, D. HELLRUNG, R. POPRAWE: *Micro-structuring with Nd:YAG-Lasers*
In: Proc. of the 30th int. CIRP Seminar on Manufacturing Systems – LANE'97 Erlangen, S.561–569, Meisenbachverlag Bamberg, 1997
- [61] D. HELLRUNG, A. GILLNER, R. POPRAWE: *Laser beam removal of micro-structures with Nd:YAG-Lasers*
In: Lasers in Material Processing, Laser'97, SPIE Vol.3097, S.267–272, 1997
- [62] BERND LÄSSIGER: *Kontrollierter Formabtrag durch Sublimation mittels Laserstrahlung*
Zugl. Diss., Techn. Hochschule Aachen, 1994, Shaker Verlag, 1995
- [63] N.N.: *Das Maho Lasercaving – ungeahnte Dimensionen im Formenbau*
Opto Elektronik Magazin, Vol. 6, No. 1, 1990
- [64] GÜNTER EBERL, ULI SUTOR: *Laser-Abtragen – eine neue Technologie*
Laser-Praxis, Carl Hanser Verlag, München, 1990

- [65] FRANZ ALLGAYER: *Lasercaving – eine neue Bearbeitungstechnologie*
Technische Rundschau 11/91, S.36–38, 1991
- [66] H.K. TÖNSHOFF, M. STÜRMER, L. OVERMEYER, F. VON ALVENSLEBEN: *Strukturieren technischer Oberflächen mittels Laserstrahlung*
Laser und Optoelektronik, 25 (2) 1993
- [67] H.K. TÖNSHOFF, M. STÜRMER: *Formabtrag und Texturierung von Keramik und Metallbauteilen mit Laserstrahlung*
Metall, 47. Jahrgang, Heft 5, Mai 1993
- [68] G. EBERL, P. HILDEBRANDT, M. KUHLE, U. SUTOR, P. WRBA: *Neue Entwicklungen beim Laserabtragen*
Laser und Optoelektronik, 24 (2) 1992
- [69] ECKHARD MEINERS: *Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulsten Nd:YAG-Lasern als zweistufiger Prozeß*
Uni. Diss. Stuttgart, B. G. Teubner, Stuttgart, 1995
- [70] GERHARD WITJES, P. HILDEBRANDT, MICHAEL KUHLE, PETER WRBA: *Der direkte Weg – Laserabtragen im Werkzeug- und Formenbau rechnet sich*
Form und Werkzeug, Carl Hanser Verlag, März 1996
- [71] MARTIN STÜRMER: *Materialabtrag mit Nd:YAG-Lasern*
Fortschritts-Berichte, VDI Reihe 2 Nr. 352, VDI Verlag, Düsseldorf, 1995
- [72] PRESTON LEE GALE: *Method of deburring intersecting drilled holes*
United States Patent 4.081.6550, March 29, 1978
- [73] HELMUT HEIM: *Process for smoothing the eye of a needle and needle made thereby*
United States Patent 4.159.686, July 30, 1979
- [74] HANS ULRICH BUTZ: *Entgraten mit Laser*
FHT Esslingen, Daimler Benz AG, Diplomarbeit, 1983
- [75] JÜRGE STEFFEN: *Procédé d'ebavurage d'un instrument acéré, dispositif de mise en oeuvre du procédé et instrument acéré obtenu par le procédé.*
Europäisches Patent (EP) 0 038 297 B1, 1984
- [76] GERHARD FRITZSCHE, DIETER BURGER, WALTER BURBÖCK: *Verfahren zum Entgraten von metallischen Werkstoffen*
Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift DE 33 44 709 A1, 1985
- [77] N.N.: *Cutting the flash and the cost of forgings – by laser*
Metalworking Production, Band 130 (1986) Heft 11, S. 36
- [78] HANS-WILHELM BERGMANN, HORST LINDNER: *Verfahren zum Entgraten der Kanten metallischer Bauteile*
Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift DE 40 25 566 A1, 1992

- [79] MICHAEL BOGART, MICHEAL KASSIM: *Method of deburring eyeless needle blanks with a laser beam*
United States Patent 5.889.255, March 30, 1999
- [80] STEPHAN WOLFRUM: *Einsatz des Laserspanens zum Entgraten*
Studienarbeit, IfSW 94–66, Universität Stuttgart, 1994
- [81] ECKHARD MEINERS, MATHIAS WIEDMAIER: *Verfahren zum Entgraten oder Kantenbrechen von Werkstücken sowie Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens*
Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift DE 43 26 236 A1, 1995
- [82] JÜRGEN DIENERT: *Reaktives Entgraten mit einem Nd:YAG-Laser*
Studienarbeit, IfSW 95–17, Universität Stuttgart, 1995
- [83] MATHIAS WIEDMAIER: *Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren*
Univ. Diss., Uni Stuttgart, B.G. Teubner, Stuttgart, 1997
- [84] M. SCHLEGEL: *Laser-Abgraten von Schmiedeteilen*
Konferenz-Einzelbericht: FTK'91, S.151, Fertigungstechnisches Kolloquium, 1./2. Oktober 1991, Stuttgart, Springer Verlag, 1991
- [85] KLAUS FRIETSCH: *Verfahren und Vorrichtung zur Kantenverrundung von Federn*
Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift DE 40 20 700 A1, 1992
- [86] FRANZ JOSEF SIEBERS: *Verfahren zum Verrunden eines Grates*
Deutsches Patentamt, Patentschrift DE 44 43 148 C2, 1996
- [87] N.N.: *Schräge Löcher präzise gestanzt*
mav 4 – 1997, S. 120
- [88] H. HAFERKAMP, F. VON ALVENSLEBEN, O. THÜRK: *Entgraten ohne Feile*
Laser-Praxis Juni 1997, LS 34–35, Carl Hanser Verlag, München
- [89] N.N.: *Flexible Nachbearbeitung thermoplastischer Formteile*
LZH Aktuell, Ausgabe 19, Okt 1998, LZH, Hannover
- [90] LAROUX K. GILLESPIE: *The Battle Of The Burr: New Strategies and New Tricks*
Manufacturing Engineering, S.69–78, February 1996
- [91] MARCUS WEBER: *Matrix zur Auswahl eines Entgratverfahrens*
Interne Information von AT-MO/EMA, Robert Bosch GmbH, 2000
- [92] N.N.: *Vergleich von Entgratverfahren zum Entgraten einer Bohrung*
Interne Information von FV/PLM5, Robert Bosch GmbH, 2000

- [93] N.N.: *Werkstoffdatenbank*
Internes Informationssystem, Robert Bosch GmbH, 2000
- [94] FRIEDHELM RICHTER: *Physikalische Eigenschaften von Stählen und ihre Temperaturabhängigkeit*
Verlag Stahleisen M.B.H. Düsseldorf, 1983
- [95] STEFAN DAUER: *Nd:YAG-Laserstrukturierung in der Silizium-Mikromechanik*
Univ. Diss. TU Braunschweig, Shaker Verlag, Aachen, 1999
- [96] N.N.: *Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse FMEA*
Firmenschrift Qualitätssicherung in der Bosch Gruppe, Heft 14, Robert Bosch GmbH, 1998
- [97] MARCEL R. SINGLETON: *Cost-Analysis Approach to Evaluating Electrochemical Deburring Systems*
Die Casting Engineer, Band 37 Heft 4, S. 54–55, 1993
- [98] WOLFGANG FILLI: *Vor der Entscheidung lohnt auf jeden Fall der Test mit Musterteilen*
Industrieanzeiger 25·26/97 (Band 119), S.22–25, 1997